

## 마이크로 멤브레인을 이용한 풍화토의 함수특성곡선 분석

### An Interpretation of Soil Water Retention Curves of Weathered Soils Using Micro-Membrane

오 세 봉<sup>1</sup> Oh, Seboong

김 성 진<sup>2</sup> Kim, Seongjin

#### Abstract

It takes a long period to conduct the test on soil water retention curve (SWRC) in unsaturated soils. To improve such a problem, the high air entry disk has been replaced by micro-membrane. After the soil water retention test, the results by the micro-membrane were compared with those by the ceramic disk. Multiple samples in 5 regions were used to validate that SWRCs by micro-membrane are equivalent to those by ceramic disk. Therefore, a quick procedure based on micro-membrane has been developed, which makes it available to acquire much soil water retention data. The data of SWRCs were obtained for total 29 samples using ceramic disk or micro-membrane. For Korean weathered soils, the unsaturated hydraulic characteristics are sorted by three groups. Based on van Genuchten model, the group is divided by the parameter  $n$ , and the value of  $n$  could be correlated to the void ratio as each function.

#### 요 지

불포화토의 함수특성시험은 오랜 기간이 소요된다. 이를 줄이기 위하여 고압 공기흡입치 디스크를 마이크로 멤브레인으로 대체하였다. 마이크로 멤브레인을 적용한 함수특성시험을 수행하여 그 결과를 세라믹 디스크를 이용한 시험결과와 비교하였다. 5개 지역에 대하여 많은 시료를 분석한 결과 마이크로 멤브레인을 적용한 함수특성곡선은 세라믹 디스크를 이용한 시험결과와 유사한 것으로 검증되었다. 이로 인하여 마이크로 멤브레인을 이용하여 신속한 절차기법을 개발하여 많은 양의 함수특성 성과를 획득할 수 있게 되었다. 그리고 마이크로 멤브레인을 이용한 시험을 포함하여 총 5개지역 29개 시료에 대한 함수특성곡선 데이터베이스를 구축하였다. 국내 풍화토에 대하여 불포화 수리특성은 세 그룹으로 분류할 수 있었다. 각 그룹은 van Genuchten 모델 물성치  $n$ 값에 따라서 분류되며  $n$ 값은 간극비의 함수로 상관관계를 찾을 수 있었다.

**Keywords :** Fine particles, Soil water retention curves, Unsaturated soils, Void ratio, Weathered soils

1 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., Tel: +82-53-810-3512, sebungoh@yu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 영남대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

불포화토의 수리특성은 함수특성곡선과 수리전도도로 표현할 수 있다(Kim, 2009; Oh et al., 2012). 그 중에서 함수특성곡선은 기본적인 수리특성으로 볼 수 있고 모관흡수력과 포화도 (또는 함수비) 간의 관계로 정의된다. 공기 함입치가 충분히 큰 디스크를 포화시키고 불포화 시료의 간극수가 이 디스크와 연속상을 이루도록 시험장치를 설치하면, 시료 내의 공기와 간극수 유로망을 분리하여 압력을 조절하거나 측정할 수 있다. 고압 공기함입 디스크(high air entry disk, HAED)는 통상적으로 Kaolin을 소결시켜 제작한다(Fredlund and Rahardjo, 1993; Lu and Likos, 2004). 이러한 디스크의 공기함입치가 클수록 투수계수가 낮고 두께가 두꺼울수록 간극수가 빠져나가는 시간이 더욱 오래 소요된다.

Nishimura 등(2012)에 의하면 두께가 얇은 마이크로 멤브레인을 사용하면 디스크 부분의 침투 소요시간을 단축할 수 있다. Jung 등(2015)은 압력판 추출시험에서 TDR 측정을 수행하는 연구에서 마이크로 멤브레인을 적용하였다. 본 연구에서는 국내 풍화토에 대하여 상이한 디스크에 따른 시험결과를 비교하여 마이크로 멤브레인을 적용한 함수특성시험을 검증하려고 한다.

마이크로 멤브레인을 이용하면 신속한 함수특성시험을 수행할 수 있으므로 기존의 디스크에 비하여 많은 양의 데이터를 축적할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 국내 풍화토 시료를 대상으로 함수특성시험을 수행하

여 5개 지역 29종의 시료에 대하여 많은 양의 데이터를 획득하였다. 이를 분석하여 van Genuchten 함수특성 모델(van Genuchten, 1980; van Genuchten et al., 1991)의 계수에 대한 상관관계를 구하였다. 특히 세가지 대표곡선으로 구분되는 그룹별로 함수특성곡선의 계수를 간극비에 대한 상관관계로 소개하였다.

## 2. 실험계획

불포화토에서 함수특성곡선(soil water retention curve, SWRC)은 흙 조직의 수리특성을 평가하는 핵심적인 역할을 한다. 모관흡수력이 변화하여도 간극비와 입자의 조직과 배열이 유지된다면 임의의 지층에서 함수특성곡선은 유일한 곡선으로 나타난다고 가정할 수 있다. 함수특성곡선은 일반적으로 체적 함수비( $\theta$ )와 모관흡수력의 관계로 정의되며, van Genuchten(1980)은 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n} \right]^m \quad (1)$$

- 여기서,  $\theta$  : 유효포화도
- $\theta_s$  : 포화 체적함수비
- $\theta_r$  : 잔류 체적함수비
- $u_a$  : 간극공기압(대기압에서는 0)
- $u_w$  : 간극수압

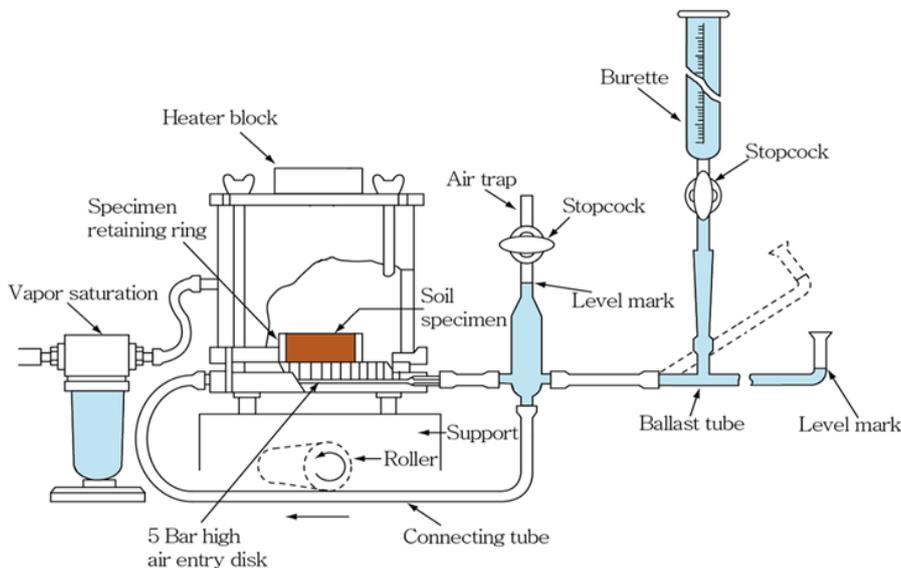


Fig. 1. Illustration of the volumetric pressure plate extractor (Oh and Lu, 2014)

- $u_a - u_w$ : 모관흡수력
- $\alpha$  : 공기함입치( $u_b$ )의 역수
- $n$  : 함수특성곡선의 기울기와 관련된 계수
- $m = 1 - 1/n$

유효포화도(effective saturation)  $\theta$ 는 체적함수비 뿐 아니라 포화도의 함수로 정의할 수 있으며 간극수의 체적을 포화 및 잔류상태에 대하여 규준화한 변수이다.

Fig. 1은 함수특성곡선을 획득하기 위한 대표적인 시험장치인 압력판추출시험기(volumetric pressure plate extractor, VPPE)의 개요도이다. 압력판추출시험기는 고압의 공기함입 저항치(high air entry value)를 갖는 세라믹 소재 판(약하여 세라믹디스크)으로 모관흡수력을 조절하여 시험하면서 시료 내로 들어가거나 빠져나오는 물의 양을 측정할 수 있다.

기존의 역학적 시험법에서는 건조와 습윤과정을 포함한 함수특성곡선을 얻기 위하여 수주 간의 기간이 필요하다. 이처럼 장기간의 시험과정에서는 측정오차가 발생하거나 시험오류가 발생할 수 있다. 세라믹 디스크는 투수계수가 매우 낮아서 흡 시료를 침투한 간극수가 디스크의 두께를 통과하는 많은 시간이 추가적으로 소요된다. 대체 소재 마이크로 멤브레인(micro-membrane, microporous membrane)은 토양학 분야에서 용매의 이동을 조절할 때 널리 쓰이는 섬유 필터로, 두께가 얇고 공기함입치를 100~200kPa 수준을 가질 수 있다. 최대 공기함입치는 마이크로 멤브레인이 세라믹 디스크에 비해 절반 정도이지만 두 재료의 두께는 50배 정도 차이

가 난다. Table 1과 같이 공기함입치가 5bar인 세라믹 디스크는 두께가 7mm, 투수계수가  $1.21 \times 10^{-9} m/sec$  수준인 경우 간극수가 디스크를 이동하는데 각 단계 1일 또는 이상 소요되지만 마이크로 멤브레인으로 대체할 경우 두께가 얇아서 경험적으로 2~3시간 내로 단축될 수 있다. 마이크로 멤브레인은 Pall Corporation에서 제조한 것으로 폴리에테르 술폰(polyether sulfone)을 사용하였고 Table 1에서 보여지듯이 공기함입치는 250kPa이며 두께는 0.14mm인 제품을 사용하였다. Fig. 2에서는 마이크로 멤브레인을 적용한 밀판 시스템에 대하여 보여준다. 우선 기존 세라믹 디스크 위치에 간극이 큰 통수 디스크(porous disk)를 거치한다. 그 위에 마이크로 멤브레인을 올리고 고정을 해주면 된다. 멤브레인의 공기함입치는 250kPa이지만 100kPa이상에서 시험을 할 경우에 때때로 간극수가 계속적으로 유출이 되어서 100kPa까지만 시험을 수행하였다. 이러한 현상은 멤브레인이 얇아서 높은 수준의 흡수력하에서 공기확산이 누적되는 현상일 수 있다.

본 연구에서는 첫 번째로 마이크로 멤브레인을 적용한 함수특성곡선을 세라믹 디스크에 의한 실험과 비교하여 검증하고 급속 함수특성곡선에 대한 적용성을 검증한다. 두 번째로 다양한 국내 시료들의 DB를 구축하고 함수특성곡선을 비교하여 분석하려고 한다. 이러한 불포화 수리특성 실험 및 분석을 위해 KM지역 1개, Y지역 8개, C지역 5개, A지역 7개, D지역 8개로 총 29개 풍화토 시료에 대해서 기본 물성시험을 수행하고 통일 분류법(USCS)으로 분류하였다.

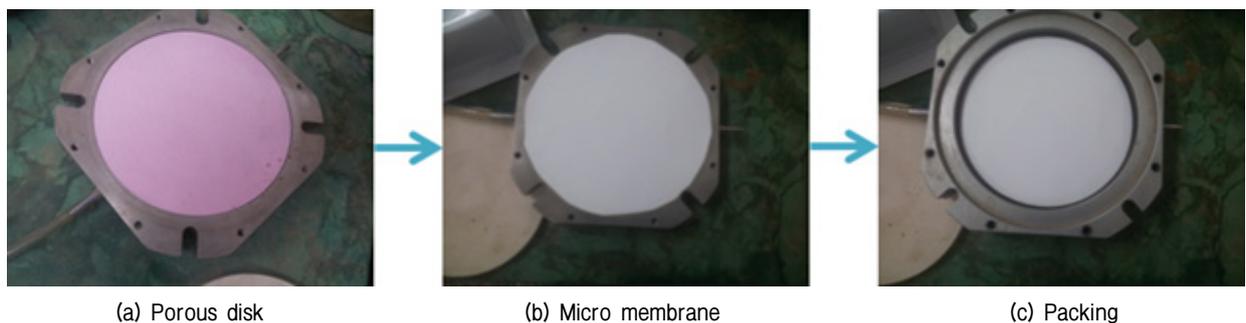


Fig. 2. Pedestal with micro-membrane in the bottom of VPPE

Table 1. A comparison of ceramic disk and micro-membrane

Item	Ceramic disk	Micro-membrane
Maximum air entry value	5 bar (500 kPa)	2.5 bar (250 kPa)
Pore size	0.5 $\mu m$	0.45 $\mu m$
Typical thickness	7 mm	0.14 mm

Table 2. Basic properties on physical and geotechnical features

Samples	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	w (%)	USCS	Gs	Void ratio	Gravel (%)	Sand (%)	Clay (%)	Uniformity (Cu)	Curvature (Cc)
KM	1.74	1.605	8.42	SW	2.53	0.58	7.33	90.45	2.22	7.47	1.32
Y2-5	1.78	1.48	20.45	SM-SC	2.69	0.82	17.26	68.9	13.84	-	-
Y2-6	1.78	1.48	20.45	SW	2.72	0.84	11.66	83.41	4.93	8	1.13
Y3-1	1.64	1.34	2.25	SP	2.69	1	2.2	96.81	1	5.2	1.11
Y3-2	1.64	1.4	17.09	SP	2.71	0.94	15.96	83.19	0.85	6.21	0.83
Y3-3	1.81	1.55	16.94	SP	2.75	0.78	4.35	93.08	2.57	5.75	1.22
Y4-4	1.79	1.46	22.6	SP	2.71	0.85	13.87	85.43	0.7	7.5	0.83
Y4-5	1.67	1.44	15.6	SW	2.66	0.84	12.63	81.47	5.9	9.44	1.38
Y4-6	1.69	1.46	15.6	SW	2.71	0.86	10.5	83.5	6	9.14	1.29
C3-2	1.27	1.07	18.24	SP	2.38	1.22	9.44	89.54	1.03	9.38	0.74
C3-3	1.53	1.26	21.45	SW	2.56	1.03	20.98	77	2.03	12.35	1.79
C3-4	1.61	1.22	32.26	SP	2.69	1.21	18.36	77.79	3.85	12	0.93
C3-5	1.64	1.31	24.88	SP	2.86	1.18	23.48	74.32	2.2	12.5	0.75
C3-6	1.5	1.33	12.91	SP	2.67	1.01	15.96	80.03	4.01	12	0.86
A1-2	1.59	1.48	7.5	SP	2.64	0.79	-	-	3.7	-	-
A2-1	1.8	1.52	18.2	SM	2.66	0.75	7	54	37	140.6	0.6
A2-2	1.9	1.74	9.2	SW-SM	2.64	0.52	22.9	68.1	9	15.9	1.6
A3-1	1.76	1.5	17	SM	2.68	0.78	3.3	79.1	17.6	-	-
A3-2	1.73	1.59	9.1	SW-SM	2.72	0.72	7.6	81.4	11	-	-
A4-1	1.89	1.68	12.3	CL	2.67	0.59	28.7	31.1	40.2	-	-
A4-2	1.88	1.73	8.6	SM	2.65	0.56	12.1	72.9	15	-	-
D1-2	1.55	1.41	9.8	SM	2.66	0.89	-	-	-	-	-
D1-3	1.68	1.42	18.2	SC	2.67	0.88	-	-	-	-	-
D2-1	1.91	1.54	23.6	CL	2.68	0.72	12.5	23.7	63.8	-	-
D2-2	1.99	1.71	16.6	SM	2.66	0.58	13.2	51.8	35	-	-
D2-3	1.84	1.61	14.1	SM	2.66	0.65	3.5	47.3	49.2	-	-
D3-1	1.83	1.64	11.5	SC	2.67	0.54	2.9	57.3	39.8	-	-
D3-2	1.83	1.66	10.3	SC	2.68	0.54	1.7	48.4	49.9	-	-
D3-3	1.84	1.61	14.4	SC	2.66	0.59	24.6	45.3	30.1	-	-

Y 지역은 SP가 4개, SM-SC 1개, SW 3개로 총 8개로 분류된다. #200체 통과한 점토의 함유율은 5% 미만 이 5개로 대부분을 차지한 반면 12%가 넘는 Y2-5 시료도 존재하였다. 간극비는 0.8~0.89 사이에 분포가 5개로 가장 많았고 모두 1.0이하의 값을 나타냈다. C지역은 SP 4개, SW 1개로 총 5개 시료로 분류되며, 점토의 함유율은 모두 5% 미만이며 간극비는 모두 1.0 이상의 분포가 나타났다. A지역은 SM, SP, CL, SW-SM 시료 총 7개를 대상으로 하며, #200체 통과한 점토의 함유율은 다양하게 나타났다. D지역은 SM, SC, CL 시료 총 8개로 시험하였다.

### 3. 마이크로 멤브레인을 이용한 함수특성시험

본 연구에서는 KM지역 1개와 Y지역 8개, C지역 5개,

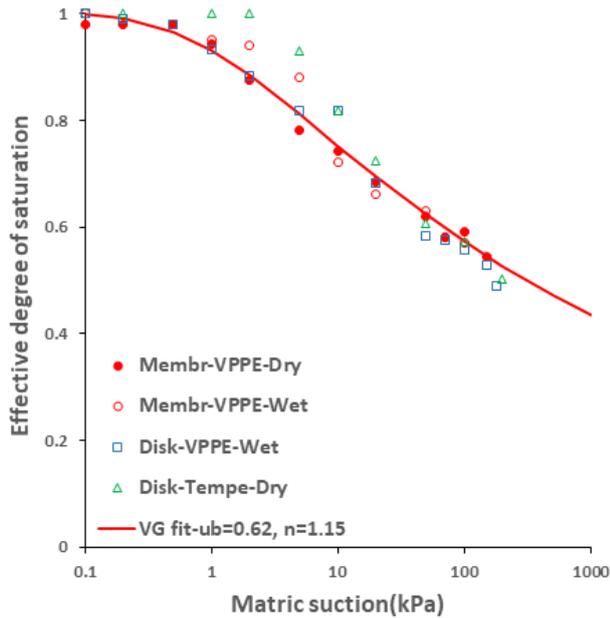
A지역 7개, D지역 8개 총 29개 지역에 대해서 함수특성 시험을 수행하였다. 함수특성곡선을 구하기 위해 KM 지역, Y지역, C지역에서는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판 추출시험과 세라믹디스크를 이용한 템피셀 시험을 수행하였고 A지역, D지역에서는 마이크로 멤브레인을 이용한 VPPE로 시험하였다.

KM지역에서는 세라믹디스크(범례상에 Disk로 표시)를 이용한 템피셀(범례상 Tempe) 시험 1회와 압력판추출시험(범례상 VPPE) 1회, 마이크로 멤브레인(범례상 Membr)을 이용한 압력판추출시험 1회 총 3회 실험을 수행하였다. Fig. 3(a)에서는 유효포화도를 이용한 함수특성에서 대표곡선을 산정하였다. 대표곡선은 실험결과 나타난 여러 곡선들에 대한 평균적인 회귀분석 결과나 반복성을 보이는 곡선중에서 선정하였다.

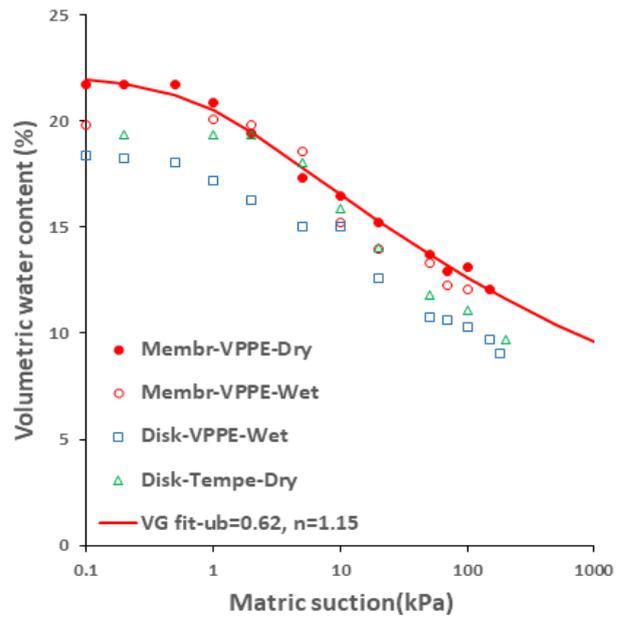
실험치들은 대표곡선과 대체로 일치하였고, 모관흡

수력이 10kPa 이하 시 실험치들은 다소 분산되어 나타나고 있다. Fig. 3(b)에서는 체적함수비와 모관흡수력 관계를 보여주는데, 마이크로 멤브레인 시험 시 결과가 대표곡선과 유사하였다. 세라믹 디스크 시험 시에는 포화 체적함수비가 낮게 나타났기 때문에 실험치들이 대표곡선의 아래쪽에 분포하였다. 이러한 차이는 함수특성시험 과정 이전에 시료의 성형시 초기조건에서 발생한 것으로 판단된다.

C지역은 C3-2부터 C3-6까지 총 5개의 세트로 구분하였다. C3-2는 세라믹 디스크를 이용한 템피셀 시험 각각 2회 수행하였고, C3-6은 1회 수행하였다. C3-3은 세라믹 디스크를 이용한 템피셀 시험 2회 수행하였으며, C3-4는 같은 시험을 1회 수행하였다. C3-5 시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력관추출시험 2회, 세라믹 디스크를 이용한 템피셀 시험을 1회, 총 3회 수행하였다. Fig. 4는 C3-5시료에 대한 함수특성곡선을 나타내고

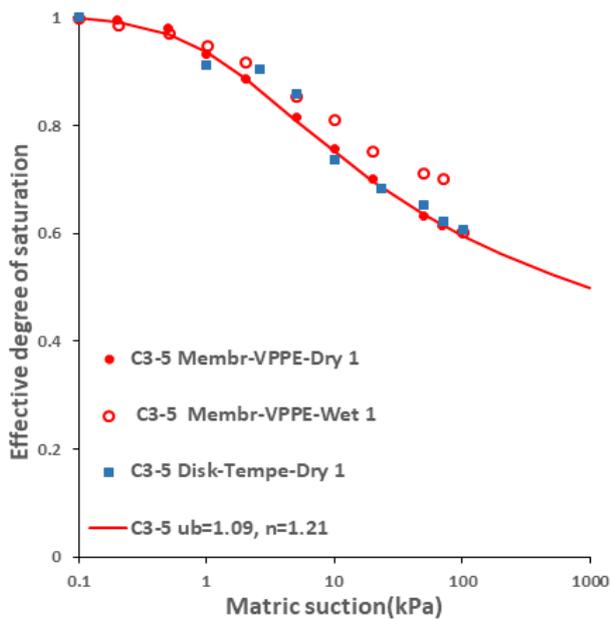


(a) Effective saturation vs. matrix suction

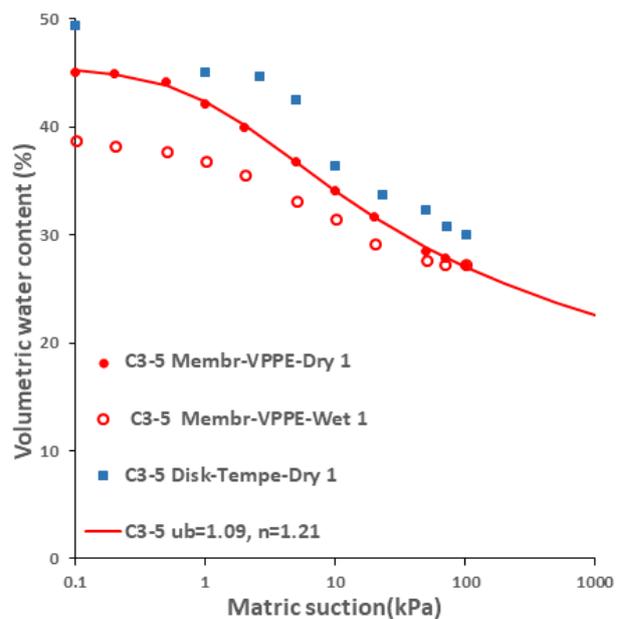


(b) Volumetric water content vs. matrix suction

Fig. 3. Soil water retention curves for KM region



(a) Effective saturation vs. matrix suction



(b) Volumetric water content vs. matrix suction

Fig. 4. Soil water retention curves for C region

있다. Fig. 4(a)에 나타난 모관흡수력에 따른 유효포화도 관계는 대표곡선을 중심으로 실험치가 잘 일치하는 것으로 나타난다. 마이크로 멤브레인을 적용한 습윤시험 결과는 기울기가 다소 완만하게 보이지만 나머지 결과들은 매우 잘 일치하고 있다. 한편 Fig. 4(b)에서는 시험시 초기 함수비의 차이로 인하여 대표곡선을 중심으로 시험치들의 분산이 나타나고 있다. 초기조건의 차이를 배제하면 마이크로 멤브레인을 이용한 시험과 세라믹 디스크를 이용한 다양한 방법의 시험결과가 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

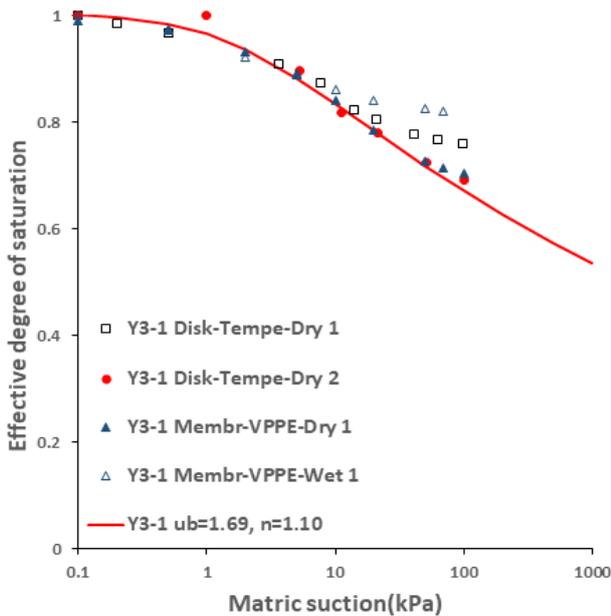
Y지역은 Y2, Y3, Y6지역으로 세분할 수 있다. 그중에서 Y3지역은 Y3-1과 Y3-2, Y3-3 시료로 분류하였다. Y3-1 시료는 세라믹디스크를 이용한 텀피셀 시험 2회, 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험 1회 총 3회 실험을 수행하였다. 이 절에서는 마이크로 멤브레인과 세라믹디스크를 이용한 결과들을 비교할 수 있는 Y3-1 시료에 대하여 기술하며, Y3-2와 Y3-3 시료는 다음절에서 설명할 것이다.

Fig. 5(a)에 나타난 Y3-1의 모관흡수력에 따른 유효포화도 관계는 대체로 일치하지만 10kPa 이후 실험치들이 대표곡선에서 약간 분산하는 경향을 보인다. 가장 큰 차이는 VPPE 습윤시험에서 기울기가 완만한 곡선이 나타났다. Fig. 5(b)에서는 초기 체적함수비 부분에서 실험치들이 차이를 보였으며 텀피셀 세라믹 디스크 #1 시험

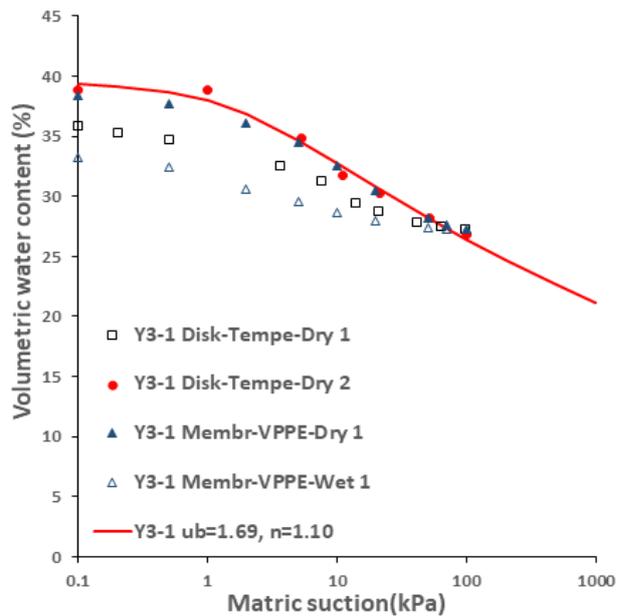
결과와 마이크로 멤브레인 습윤곡선이 함수비가 낮게 나타나고 있다. 반면 나머지 실험치들은 대표곡선과 일치하는 경향을 보인다.

Y4지역은 세가지 시료 Y4-4와 Y4-5, Y4-6로 분류하였다. Y4-4 시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험만 2회 실험을 수행하였으며 세라믹디스크를 이용한 시험을 수행하지 않아서 비교할 수 없었다, Y4-5 시료는 세라믹 디스크를 이용한 텀피셀 시험 3회, 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 1회, 총 4회 실험을 수행하였다. Y4-6 시료는 세라믹 디스크를 이용한 텀피셀 시험과 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 각각 1회씩 총 2회 실험을 수행하였다.

Fig. 6(a)에서는 Y4-5 시료, Fig. 6(b)에서는 Y4-6 시료의 유효포화도와 모관흡수력 관계에 대하여 상이한 밀판을 가지고 실험한 결과들을 비교하고 있다. Fig. 6(a)에서 Y4-5 시료의 경우, 유효포화도에 대한 대표곡선과 대체로 일치하는 경향을 보이지만 모관흡수력이 100kPa 부근에서는 마이크로 멤브레인을 이용한 시험결과에서 유효포화도가 낮게 나타나고 있다. Y4-6 시료에서는 마이크로 멤브레인을 이용한 건조 및 습윤 시험결과가 세라믹 디스크를 장착한 텀피셀 시험결과와 매우 유사하게 나타났다. 전반적으로 마이크로 멤브레인을 이용한 함수특성곡선이 세라믹디스크를 적용한 시험결과와 유사하게 나타나고 있다.

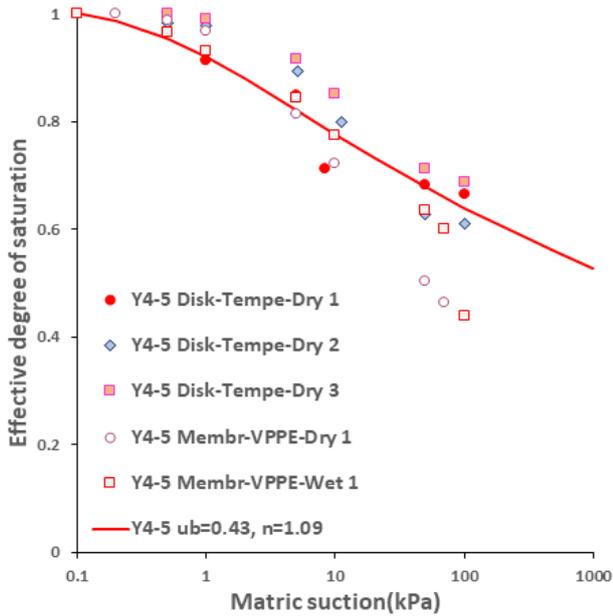


(a) Effective saturation vs. matric suction

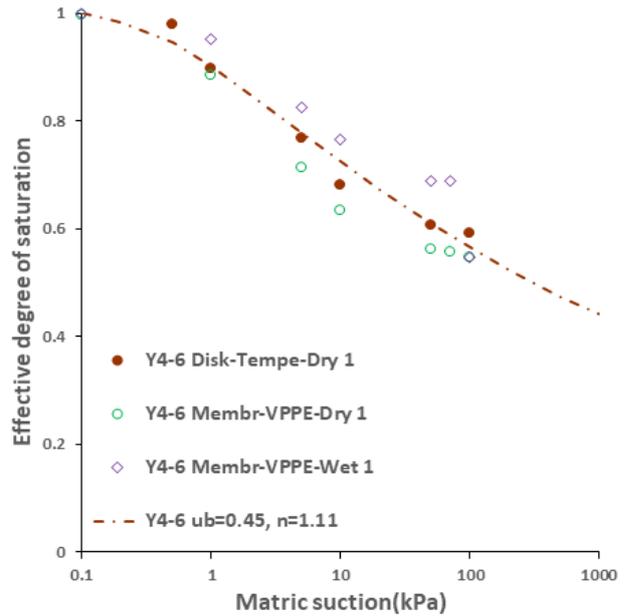


(b) Volumetric water content vs. matric suction

Fig. 5. Soil water retention curves for Y3 region



(a) Effective saturation vs. matric suction for Y4-5 sample



(b) Effective saturation vs. matric suction for Y4-6 sample

Fig. 6. Soil water retention curves for Y4 region

이러한 시험결과들을 보면 함수특성곡선에서 초기조건 차이가 다소 발생하고 습윤 및 건조과정에 따른 차이를 보이지만 마이크로 멤브레인을 이용한 시험과 세라믹디스크를 이용한 시험결과들이 텀피셀이나 VPPE에 의한 상이한 시험방법에 의해서도 유사하게 나타났으며 대표곡선으로 모델할 수 있었다. 따라서 마이크로 멤브레인을 적용한 함수특성시험 결과를 이용하여 함수특성곡선을 획득할 수 있음을 검증할 수 있었다.

#### 4. 함수특성곡선 데이터베이스

전절에서 비교한 함수특성시험을 포함하여 다양한 시험방법으로 함수특성 데이터베이스를 구축하였다. Fig. 7에서는 C지역의 대표적 실험 결과와 대표 함수특성곡선을 나타내고 있다. C3-2는 세라믹 디스크를 이용한 텀피셀 시험 2회 수행하였으며, C3-3과 C3-4는 세라믹 디스크를 이용한 텀피셀 시험 각각 2회, 1회 수행하였다. C3-6 시료는 세라믹 디스크를 이용한 텀피셀 시험을 1회 수행하였다. C3-5 시료는 전 절에서 설명하였다.

Fig. 8에서는 Y2와 Y3, Y4지역의 함수특성곡선을 보여주고 있다. Y2지역은 두군데서 시료를 채취하였고 Y2-5와 Y2-6으로 분류하였다. 두 시료 모두 세라믹 디스크를 이용한 텀피셀 시험을 1회씩 수행하였다. Y3-3 시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판 추출시험

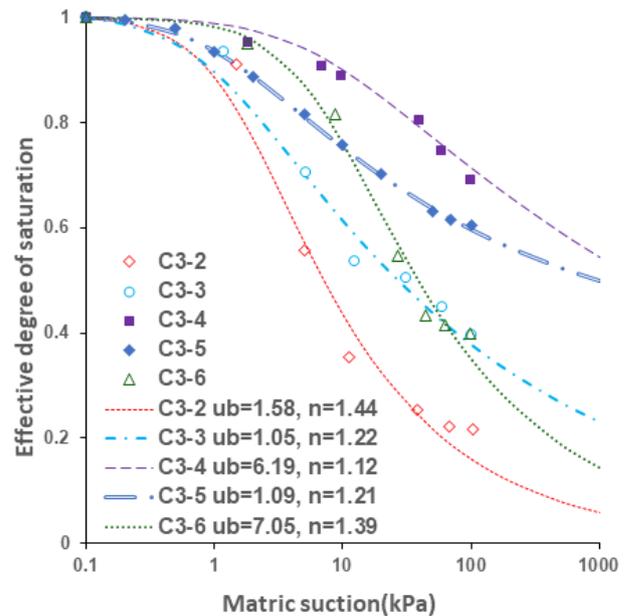


Fig. 7. Soil water retention curves for C region

만 2회 수행하였다. Y3지역은 세군데서 시료를 채취하였고 Y3-1은 전 절에서 설명하였으며 Y3-2 시료는 세라믹 디스크를 이용한 텀피셀 시험을 2회 수행하였다. Y3-3 시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험만 2회 수행하였다. Y4지역은 세군데서 시료를 채취하였고 Y4-5와 Y4-6는 전절에서 설명하였으며, Y4-4 시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판 추출시험만 2회 실험을 수행하였다.

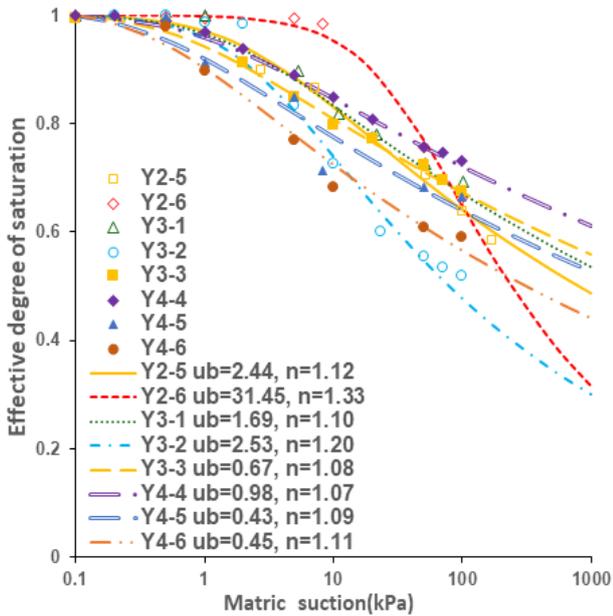


Fig. 8. Soil water retention curves for Y region

Fig. 9에서는 A1과 A2, A3, A4지역의 함수특성곡선을 보여주고 있다. A1-2시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 1회 수행하였다. A2-1과 A2-2시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 각각 1회 수행하였다. A3-1과 A3-2시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 각각 1회 수행하였다. A4-1과 A4-2시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 각각 1회 수행하였다.

Fig. 10에서는 D1과 D2, D3지역의 함수특성곡선을

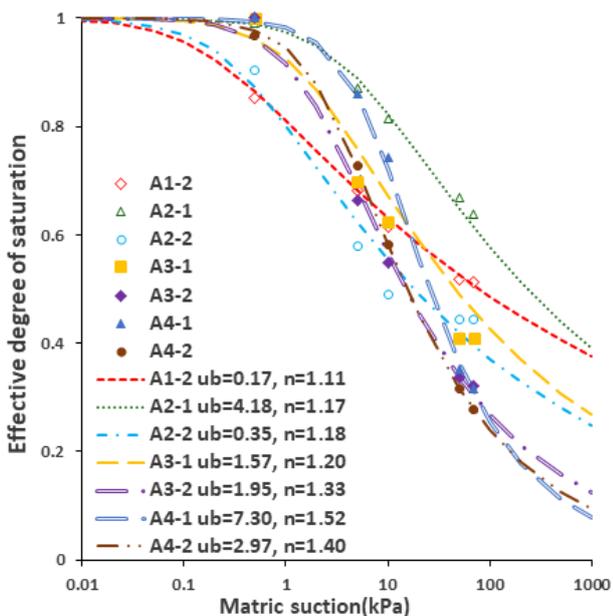


Fig. 9. Soil water retention curves for A region

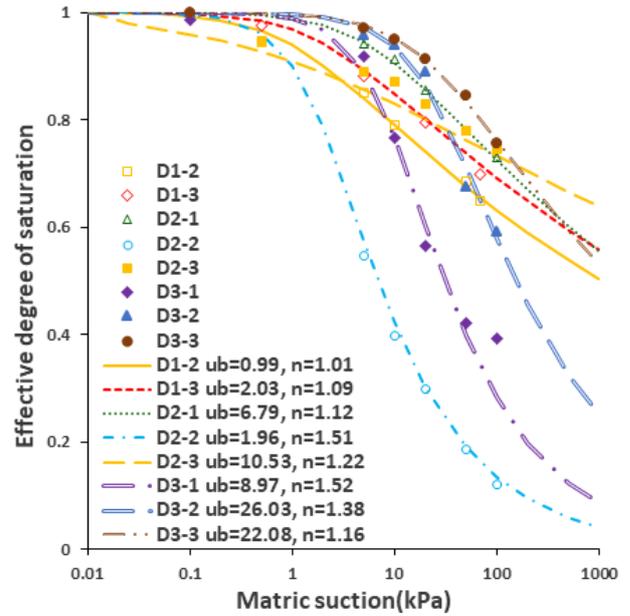


Fig. 10. Soil water retention curves for D region

보여주고 있다. D1-2과 D1-3시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 각각 1회 수행하였다. D2-1과 D2-2, D2-3시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 각각 1회 수행하였다. D3-1과 D3-2, D3-3시료는 마이크로 멤브레인을 이용한 압력판추출시험을 각각 1회 수행하였다.

Table 3에서는 Y지역과 C지역, A지역, D지역의 함수 특성시험 결과들 중 체적함수비와 공기함입치와  $n$  등 함수 특성 물성치를 정리하였다. Y지역의 포화 체적함수비는 약 31~41%에 분포를 하며 35~38% 사이의 분포가 다수를 차지했으며 공기함입치  $u_b$ 는 0.3~2.5kPa의 분포가 가장 많았다.  $n$ 은 거의 1.2이하의 분포를 보였다. C지역의 포화 체적함수비는 모두 39% 이상의 분포를 나타냈으며  $u_b$ 는 1.0~7.1kPa의 분포를 보이며  $n$ 은 1.1~1.4 정도를 나타냈다. A지역의 포화 체적함수비는 29~42%에 분포를 하며 공기함입치는 0.2~4.2kPa로 나타났고  $n$ 은 1.1~1.5정도 값을 나타냈다. D지역의 포화 체적함수비는 약 35~47%에 분포를 하며 37~40% 사이의 분포가 다수를 차지했으며 공기함입치는 1~11Pa의 분포가 다수를 차지하였으며  $n$ 은 1.1~1.4 정도로 나타났다.

Fig. 11(a)에서는 통일분류 별로 함수특성시험 결과 나타난 van Genuchten 모델의 계수  $n$ 을 간극비에 대하여 나타냈다. 함수특성시험 DB로부터 계수  $n$ 은 각 통일분류에 따라서는 뚜렷한 특징을 나타내지 않았다. 다만  $n$ 값에 따라서 Group 1( $n=1.0\sim1.19$ ), Group 2( $n=1.2\sim1.29$ ),

Table 3. Hydraulic characteristics and shear strength properties for weathered soils

Samples	USCS	$\theta_s$	$u_b$ (kPa)	$\theta_r$	$n$	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)
KM	SW	0.222	0.93	0	1.12	—	—
Y2-5	SM-SC	0.355	2.44	0	1.12	12.1	28.0
Y2-6	SW	0.316	31.45	0	1.33	7.6	30.5
Y3-1	SP	0.395	1.69	0	1.10	13.8	31.2
Y3-2	SP	0.411	2.53	0	1.20	14.5	31.7
Y3-3	SP	0.370	0.68	0	1.08	24.5	29.3
Y4-4	SP	0.354	0.98	0	1.07	1.5	30.7
Y4-5	SW	0.347	0.43	0	1.09	8.0	24.0
Y4-6	SW	0.376	0.28	0	1.11	15.0	25.2
C3-2	SP	0.427	1.58	0	1.44	9.1	33.8
C3-3	SW	0.389	1.05	0	1.22	7.9	32.0
C3-4	SP	0.460	6.19	0	1.12	7.8	33.6
C3-5	SP	0.456	1.09	0.16	1.21	6.0	32.2
C3-6	SP	0.427	7.05	0	1.39	10.1	29.0
A1-2	SP	0.290	0.17	0	1.11	2.1	37.4
A2-1	SM	0.340	4.18	0	1.17	—	—
A2-2	SW-SM	0.274	0.35	0	1.18	—	—
A3-1	SM	0.281	1.57	0	1.20	9.3	30.1
A3-2	SW-SM	0.341	1.95	0	1.33	4.2	35.5
A4-1	CL	0.420	7.30	0.27	1.52	4.4	24.8
A4-2	SM	0.288	2.98	0.15	1.40	18.1	27.7
D1-2	SM	0.315	0.99	0.02	1.10	12.0	31.7
D1-3	SC	0.386	2.03	0.01	1.09	15.3	27.8
D2-1	CL	0.355	6.787	0.10	1.12	15.5	26.3
D2-2	SM	0.380	1.961	0.13	1.51	13.8	31.5
D2-3	SM	0.378	10.53	0.001	1.22	13.0	30.3
D3-1	SC	0.374	8.965	0	1.52	8.8	27.0
D3-2	SC	0.470	26.0	0	1.38	5.7	29.3
D3-3	SC	0.395	22.08	0	1.17	10.2	26.4

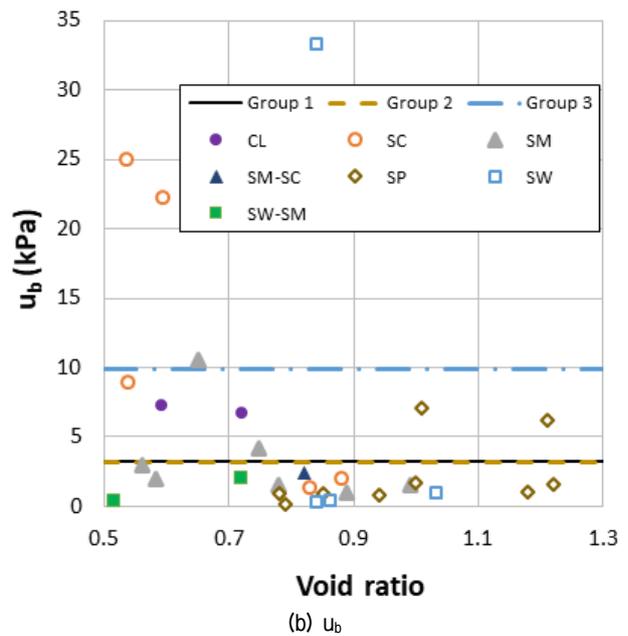
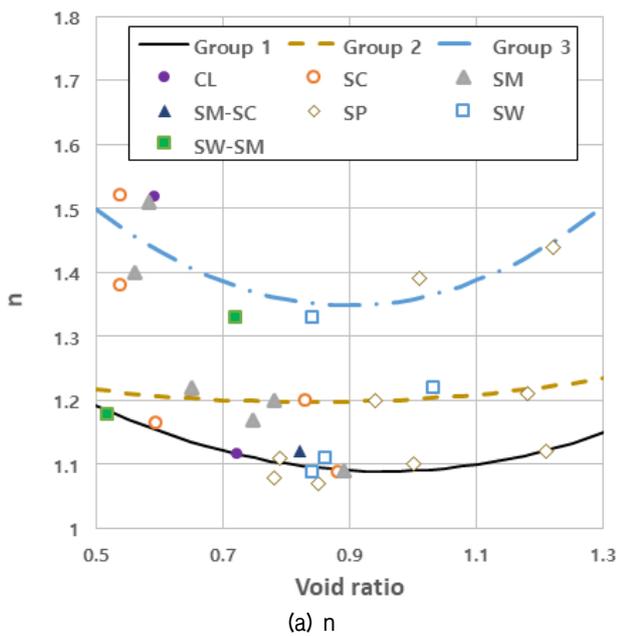


Fig. 11. Parameters  $n$  and  $u_b$  as void ratio

Group 3(n=1.3~1.6)의 세 그룹으로 나누어지는 것을 관찰할 수 있었다. 각 그룹내에서 간극비에 대한 상관관계식은 다음과 같다.

Group 1 :  

$$n = 0.50e^2 - 0.95e + 1.54 \quad (2)$$

Group 2 :  

$$n = 0.17e^2 - 0.29e + 1.32 \quad (3)$$

Group 3 :  

$$n = 0.96e^2 - 1.72e + 2.12 \quad (4)$$

각 그룹의 R2는 0.81, 0.18, 0.39이다. 상관계수는 좋지 않지만 세 그룹으로 영역이 뚜렷하게 구분되고 있음을 확인할 수 있다. 세 그룹의 특징으로부터 흙의 조직과 관련한 인자들이 n값 또는 불포화 수리특성에 복합적으로 영향을 끼치고 있는 것으로 판단되지만 각 인자의 효과를 구분하기는 어려웠다.

Fig. 11(b)에서는 van Genuchten 모델의 공기함입치 계수  $u_b$ 를 간극비에 대하여 나타내고 있다. 함수특성시험 DB로부터 계수  $u_b$ 는 각 통일분류에 따라서 구분되는 특징을 관찰할 수 있었다. SW나 SC의 일부 데이터에서는 10kPa보다 큰 공기함입치가 나타나고 나머지 경우에는 10kPa이하의 값을 가지고 있다. 반면 식 (2)~(4)에 대하여  $u_b$ 와 간극비에 대한 상관관계는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 다만 세 그룹에 대하여  $u_b$ 의 평균값은 3.29, 3.22, 9.92kPa이며, 이를 Fig. 11(b)에 나타내고 있다.

각 그룹에 대하여 평균 n 값은 Group 1에서 1.11, Group 2에서 1.21, Group 3에서 1.42였다. Fig. 12에서는 이러한 van Genuchten 모델 계수의 평균값을 이용하여 세 그룹의 함수특성곡선을 개념적으로 비교하였다. Group 1이 곡선의 기울기가 가장 완만하고 Group 2, Group 3으로 갈수록 증가한다. 이 그림에서는 각 그룹을 개념적으로 구분하기 위한 것으로, 곡선의 기울기와 관련된 n은 평균값이 각 그룹을 구분하는 대략적인 값으로 볼 수 있지만, 공기함입치  $u_b$ 는 각 그룹별로 분포의 범위가 넓으므로 평균값의 의미가 별로 없다.

본 연구에서 수행한 DB에서는 다양한 지역의 함수특성곡선을 독립적인 세 그룹으로 구분할 수 있었다. 세 그룹은 수리특성을 나타내는 n 값으로 뚜렷하게 구분되

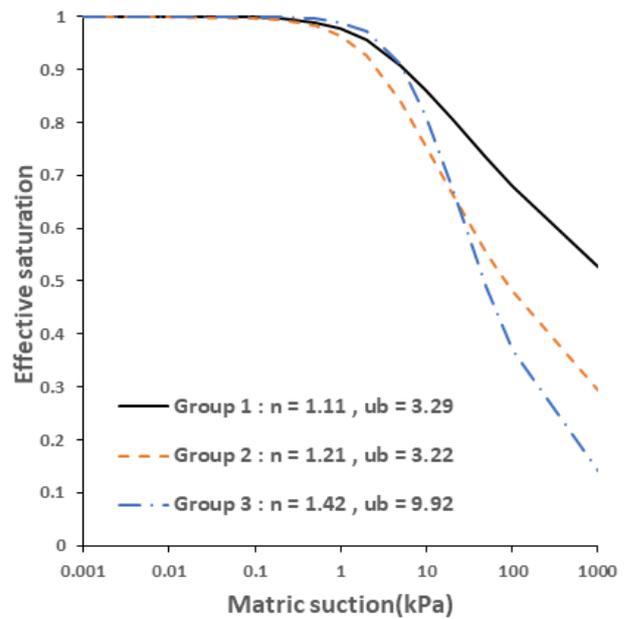


Fig. 12. Representative relationships on SWRCs for each group

지만, 각 그룹의 불포화토의 조직을 구분하는 물리적 또는 지반공학적 인자를 추출하지는 못하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 풍화토에 대하여 함수특성곡선을 급속하게 획득할 수 있도록 마이크로 멤브레인을 이용한 시험법을 검증하고 다양한 시험법에 의하여 구한 29개 데이터베이스를 분석하여 상관관계를 기술하였다.

먼저 마이크로 멤브레인을 이용한 함수특성곡선과 세라믹 디스크를 이용한 시험결과를 비교하였다. 총 5개 지역의 여러 함수특성곡선들에 대하여 마이크로 멤브레인을 통한 시험을 수행한 결과, 기존의 세라믹디스크를 이용한 시험과 유사한 결과를 나타냈으며 시험시간은 크게 단축할 수 있었다. 일부 시료에서는 초기 포화도에서 차이가 발생하였으나 마이크로 멤브레인을 이용한 함수특성곡선이 유효하다는 것을 검증할 수 있었다.

총 29개 지층에 대하여 함수특성곡선 데이터베이스를 구축하였다. 이 자료들에는 마이크로 멤브레인 시험도 포함되어 있다. 불포화 수리특성은 van Genuchten 모델 물성치 n값에 따라서 n=1.0~1.19, n=1.2~1.29, n=1.3~1.6으로 세 그룹으로 분류할 수 있었다. 각 그룹에서 n값은 간극비의 함수로 식 (2)~(4)와 같이 상관관계를 찾을 수 있었다.

## 감사의 글

이 연구는 부분적으로 한국연구재단 “불포화층의 수리-역학적 유효응력 거동을 고려한 3차원 산사태 평가 시스템 개발”(과제번호: 2019R1A2C1003604)의 연구비 지원에 의한 성과임.

## 참고문헌 (References)

1. Kim, Y. K. (2009), “Soil slope design and stability evaluation methodology considering hydraulic conductivity and rainfall characteristics”, Ph.D. Thesis, KAIST.
2. Jung, Y. S., Sa, H. D., Oh, S. B., and Lee, J. S. (2015), “Soil Water Characteristic Curve Using Volumetric Pressure Plate Extractor Incorporated with TDR System”, *Journal of Korea Geotechnical Society*, Vol.31, No.8, pp.17-28.
3. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, p.517.
4. Lu, N. and Likos, W. J. (2004), *Unsaturated Soil Mechanics*, Wiley, New York.
5. 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
6. Oh, S. and Lu, N. (2014) “Uniqueness of the Suction Stress Characteristic Curve under Different Confining Stress Conditions”, *Vadose Zone Journal*, 10.2136/vzj2013.04.0077.
7. Oh, S., Lu, N., Kim, Y. K., Lee, S. J., and Lee, S. R. (2012), “Relation between the Soil Water Characteristic Curve and the Suction Stress Characteristic Curve: Experimental Evidence from Tests on Residual Soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.138, No.1, pp.47-57.
8. van Genuchten, M. T. (1980), “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”, *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp.892-898.
9. van Genuchten, M. T., Leij, F. J., and Yates, S. R. (1991), *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*, EPA 600/2-91/065.

Received : November 19<sup>th</sup>, 2020

Revised : December 22<sup>nd</sup>, 2020

Accepted : January 18<sup>th</sup>, 2021