

산성토의 불포화 특성곡선 산정

송영석*

한국지질자원연구원 지질환경연구본부

Estimation on Unsaturated Characteristic Curves of Acid Sulfate Soils (ASS)

Young-Suk Song*

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract

The physical properties and unsaturated characteristics of acid sulfate soils were investigated and analyzed. As the results of measuring physical properties of the acid sulfate soils obtained around the Ilkwang mine area, the dry unit weight is 1.246t/m^3 and this soil is classified into the silty sand (SM) by USCS. Soil Water Characteristics Curves (SWCC) of the drying and wetting paths were measured by the automated SWCC apparatus. Also, Hydraulic Conductivity Functions (HCF) of the drying and wetting paths were estimated by the van Genuchten (1980) model which is the most well-known parameter estimation method. The hydraulic conductivity of acid sulfate soils in the dry path was continuously decreased with increasing the matric suction. However, the hydraulic conductivity in the wetting path was decreased relatively small with increasing matric suction and decreased suddenly just before water entry value of matric suction. Meanwhile, the hysteresis phenomenon was occurred in SWCCs and HCFs during the drying and wetting paths.

Keywords: acid sulfate soils, soil-water characteristics curve, hydraulic conductivity function, hysteresis, drying and wetting paths

초 록

본 연구에서는 산성토를 대상으로 물리적 특성과 불포화 특성을 조사 및 분석하였다. 부산 일광광산 주변의 산성토를 대상으로 물리적 특성을 조사한 결과 건조단위중량이 1.246t/m^3 이며, 통일분류법 (USCS)상 실트질 모래(SM)에 해당된다. 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정장치를 이용하여 건조 및 습윤과정에 대한 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하였다. 그리고 계수예측방법 가운데 가장 널리 활용되고 있는 van Genuchten (1980) 모델을 적용하여 건조 및 습윤과정에 따른 산성토의 불포화 투수계수 함수(HCF)를 산정하였다. 산성토의 불포화 투수계수함수(HCF)는 건조과정의 경우 모관흡수력이 증가함에 따라 지속적으로 감소하지만 습윤과정의 경우 모관흡수력이 낮은 수준에서 상대적으로 작게 감소하고, 수분함입치 직전에 크게 감소함을 알 수 있다. 한편, 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선과 불포화 투수계수함수는 모두 이력현상이 발생되었다.

주요어: 산성토, 흡-함수특성곡선, 투수계수함수, 이력현상, 건조 및 습윤과정

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Young-Suk Song
E-mail: yssong@kigam.re.kr

Received: 8 January, 2018
Revised: 8 February, 2018
Accepted: 13 February, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

산성토(acid sulfate soils, ASS)는 강의 하구나 해안지대의 배수가 불량한 곳에서 늪지퇴적물을 모재로 하여 발달한 흙을 나타내는 것으로 황철석(pyrite)의 산화작용으로 인하여 황화물질(sulfate)을 많이 함유하고 있는 것이 특징이다.

산성토는 환원상태로 지중에 존재할 경우 중성을 띠며 환경피해를 일으키지 않는다. 일반적으로 지중에 존재하는 산성토를 잠재적 산성토라고 정의한다. 그러나 토목공사 등으로 인하여 지중에 존재하는 산성토가 대기에 노출되는 경우 토층내 황화물질이 서서히 산화되어 토층 자체는 물론이고 지표수 혹은 지하수에 유입되어 환경오염을 유발하게 된다. 또한 산성토는 토층내 양분을 유실시키고 알루미늄, 철 등을 증대시켜 흙의 구조를 파괴하기도 한다.

이러한 산성토를 관리하기 위해서는 산성의 발달정도, 황화물질의 축적두께, 용탈가능성, 토지의 이용가치 등을 고려하여 최적의 대책방안을 마련하여야 한다. 이러한 산성토의 대책방안을 마련하기 위해서는 산성토에 대한 공학적 특성을 조사하여야 한다. 특히 자연조건에서 존재하는 산성토의 경우 대부분 불포화 상태로 존재하므로 강우 침투시 산성토의 불포화 특성에 대한 변화를 반드시 고찰하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 산성토를 대상으로 물리적 특성과 불포화 특성을 조사 및 분석하였다. 이를 위하여 먼저 부산 일광광산의 자연사면에서 채취된 산성토를 시험재료로 선정하였다. 선정된 산성토를 대상으로 물리적 특성을 조사하고, 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정장치를 이용하여 건조 및 습윤과정에 대한 흡-함수특성곡선(SWCC)을 선정한다. 불포화 투수계수함수(HCF)를 산정하기 위하여 계수예측방법 가운데 가장 널리 활용되고 있는 van Genuchten (1980) 모델을 적용하였다. 이를 토대로 건조 및 습윤과정에 따른 산성토의 불포화 투수계수함수(HCF)를 산정한다. 이와 같이 산정된 산성토의 흡-함수특성곡선(SWCC)과 투수계수함수(HCF)를 이용하여 산성토의 불포화 특성을 고찰하고자 한다.

산성토의 공학적 특성

본 연구에 사용된 산성토는 부산광역시 기장군 일광면 일광광산 주변의 자연사면에서 채취한 것이다. Fig. 1은 현장에서 채취된 산성토를 나타낸 것이다. 대상 시료의 공학적 특성을 알아보기 위하여 pH, EC, 단위중량, 비중, 입도분석, 액소성한계, 다짐시험 등을 수행하였다. 시험결과에 따르면 대상 시료는 pH가 3.47인 강산성이며, EC는 0.68dS/m로 나타났다. 통일분류법(USCS) 상에서 실트질 모래(SM)에 해당하며, 현장건조단위중량은 1.246t/m³으로 측정되었다.



Fig. 1. Acid Sulfate Soils (ASS) around the Ilkwang mine area.

Fig. 2는 일광광산 주변 산성토의 입도분포곡선을 나타낸 것이며, Table 1은 일광광산 주변 산성토의 공학적 특성을 측정한 결과이다.

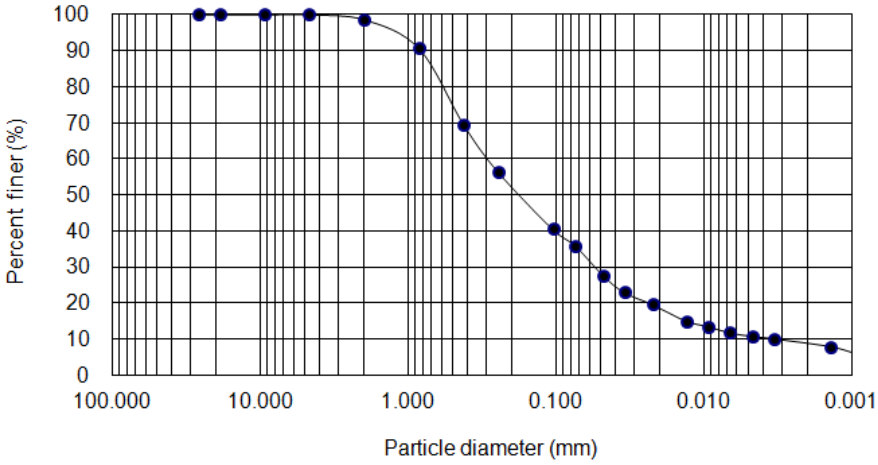


Fig. 2. Grain size distribution curve of Acid Sulfate Soils (ASS).

Table 1. Engineering properties of Acid Sulfate Soils (ASS)

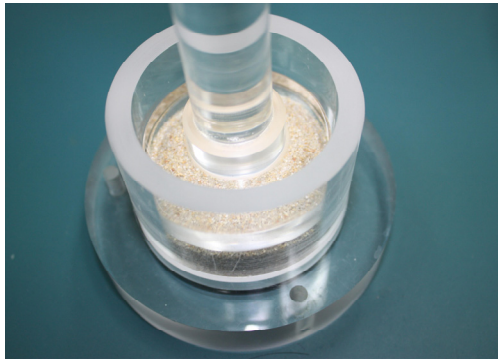
Description	Symbol	Unit	Measured value
pH (1:5)	pH	-	3.47
Electric conductivity	EC	(dS/m)	0.68
Specific gravity	G_s	-	2.72
Natural water content	w	(%)	31.64
Total unit weight	γ_t	(t/m^3)	1.64
Dry unit weight	γ_d	(t/m^3)	1.25
Effective particle size	D_{10}	(mm)	0.0045
Uniformity coefficient	c_u	-	66.7
Coefficient of curvature	c_g	-	1.9
Liquid limit	LL	(%)	39.94
Plastic limit	PL	(%)	30.05
Plastic index	PI	-	9.89
Unified soil classification system		USCS	SM

산성토의 불포화 특성곡선 측정방법 및 결과

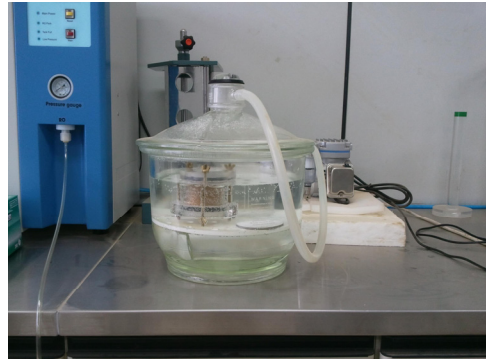
시료성형

본 시험에서는 먼저 시료를 포화시킨 후 공기압을 가하여 간극수를 배출하는 건조과정을 실시하게 된다. 플라스틱 몰드 (직경 5.05 cm, 높이 3.89 cm)와 플라스틱 봉을 이용하여 3층 다짐을 실시하였다. Fig. 3a는 플라스틱 몰드에 시료를 성형하는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라스틱 봉으로 시료를 다져 현장의 건조단위중량으로 시료를 성

형하였다. 그리고 시료 상하부에 다공석을 두어 포화시 시료내부에 물이 원활하게 흐를 수 있도록 하였다. 시료를 포화시키기 위하여 데시케이터와 진공펌프를 활용하였다. 즉 데시케이터 내에 정제된 증류수를 채우고, 성형된 시료를 약 2/3 정도 물에 잠기도록 한 다음 진공펌프를 이용하여 데시케이터 내부를 진공상태로 만든다. 이때 시료는 높은 배압을 받게 되며, 물이 시료의 하부로부터 포화되면서 상부로 흘러가기 때문에 간극내 남아 있는 공기를 제거하면서 포화가 진행된다. 모래의 경우 약 1시간 이상을 두면 시료가 포화된다. Fig. 3b는 데시케이터 내부에 성형된 시료를 위치한 모습이다(Song, 2014).



(a) Forming soil sample



(b) Saturation of soil sample

Fig. 3. Soil sample preparation.

흡-함수특성곡선(SWCC) 측정

본 연구에서는 일광광산 주변 산성토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치를 활용하였다(Song et al., 2012). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다. 본 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울, 시료준비장치, 측정시스템 등으로 구성되어 있다. 그리고 공기의 압력은 0-300 kPa 범위까지 적용할 수 있으며, 축변환기법(Hilf, 1956)을 도입하였다.

포화투수계수 측정

본 연구에서는 일광광산 주변 산성토의 포화투수계수를 산정하기 위하여 삼축투수시험을 수행하였다. 대상 시료에 대하여 변수위시험을 수행하여 투수계수를 측정할 경우 상대적으로 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 ASTM-D5084 시험법에 따른 삼축압축시험장치를 이용한 강제투수방식을 적용하였다. 시험방법은 시료를 성형하여 포화시킨후 시료의 내부에 일정한 수압을 가하여 배출되는 유량과 시간을 측정하는 것이다.

모관흡수력과 간극수량 측정결과

Fig. 4는 모관흡수력의 재하 및 제하시 단계별 간극수의 유출 및 유입량을 나타낸 것이다. 즉 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정에서는 모관흡수력이 증가함에 따라 간극수의 유출량은 증가하며, 습윤과정에서는 모관흡수력이 감소함에 따라 간극수의 유입량이 증가함을 알 수 있다. 단계별 모관흡수력을 조절하기 위하여 일정단계 모관

흡수력 수준에서 간극수 유출 및 유입량이 수렴된 이후 다음 단계의 모관흡수력을 재하 혹은 제하하였다.

한편, 그림에서 보는 바와 같이 습윤과정의 시험시간이 건조과정의 시험시간보다 상대적으로 긴 것으로 나타났다. 이러한 원인은 건조 및 습윤과정에서 간극에 갇힌 독립된 공기에 의한 흐름 저항에 의한 것으로 판단된다. 또한 동일한 공기 압 조건에서 시료내 체적함수비는 건조과정에서 더 큰 것으로 나타났다.

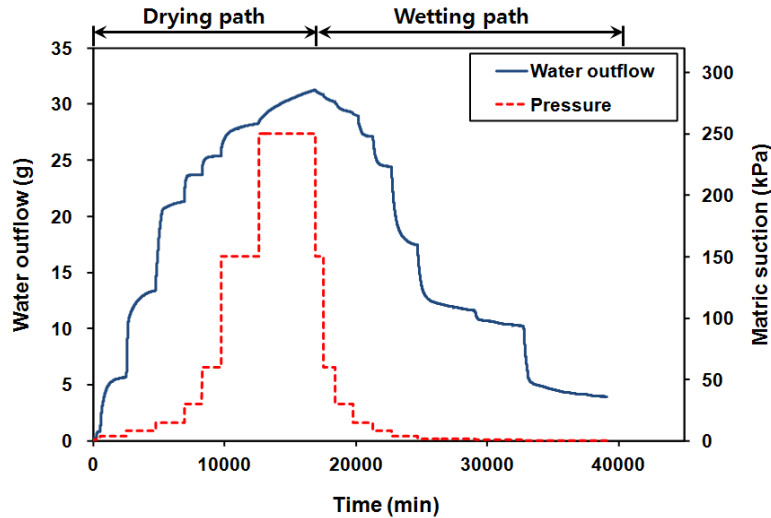


Fig. 4. Water outflow or inflow mass for various matrix suctions.

흡-함수특성곡선 산정

측정된 모관흡수력과 간극수량을 토대로 van Genuchten (1980) 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. van Genuchten (1980)은 Mualem (1976)의 제안식을 토대로 유효포화도(S_e)와 압력수두(h)의 상관관계를 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 식 (1)은 van Genuchten (1980)에 의해 제안된 흡-함수특성곡선(SWCC) 산정식을 나타낸 것이다.

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

여기서, θ_s 는 포화체적함수비, θ_r 은 잔류체적함수비, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압, α 는 공기유입값과 관계된 계수, n 은 변곡점의 경사에 관계된 계수, 그리고 m 은 잔류함수비에 관계된 계수이다.

측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 비선형 최소제곱법(nonlinear least squares analysis)을 적용하여 van Genuchten (1980)방법의 불포화 관련계수인 α , n 및 m 을 산정하였다. 최소제곱법의 신뢰도를 나타내는 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 건조과정의 경우 0.990, 습윤과정의 경우 0.988로 매우 높게 나타났다. Table 2는 흡-함수특성곡선(SWCC)의 건조 및 습윤과정에 대한 불포화 관련계수(curve-fitting parameters)를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 공기유입값과 관계된 계수 α 는 습윤과정에서 더 큰 값을 가지며, 변곡점의 경사에 관계된 계수 n 과 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 건조과정에서 미소하지만 더 큰 값을 갖는다. 표에 나타난 불포화 관련계수와 식 (1)을 이용하

여 산성토의 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

Fig. 5는 van Genuchten (1980)방법을 적용하여 산정한 불포화 관련계수를 이용하여 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성 곡선(SWCC)을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선(SWCC)에서 모관흡수력과 체적함수비는 S자 형태의 비선형적인 관계를 나타내며, 곡선의 기울기도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Table 2. Curve-fitting parameters of SWCCs

Process	α (kPa ⁻¹)	n	m	R^2
Drying path	0.196	1.837	0.456	0.990
Wetting path	0.587	1.821	0.451	0.988

Fig. 5에서 보는 바와 같이 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)에 대한 도해적인 방법을 적용하여 건조과정에서의 공기함입치(AEV)와 포화(θ_s^d) 및 잔류체적함수비(θ_r^d)와 습윤과정에서의 수분함입치(water entry value, WEV)와 포화(θ_s^w) 및 잔류체적함수비(θ_r^w)를 산정하였다. 그리고 이를 정리하면 Table 3과 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 포화체적함수비는 건조과정이 습윤과정에서 보다 크게 나타나며, 잔류체적함수비는 건조 및 습윤과정에서 동일한 것으로 나타났다.

Table 3. AEV or WEV and saturated and residual volumetric water contents

Process	θ_s	θ_r	AEV/WEV (kPa)
Drying path	0.541	0.140	2.1
Wetting path	0.490	0.140	0.7

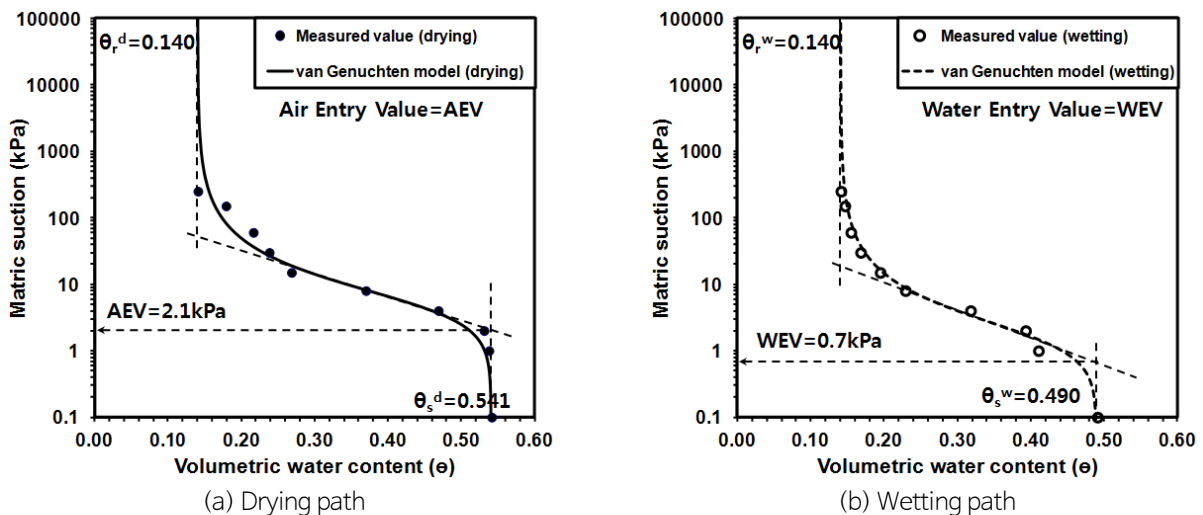
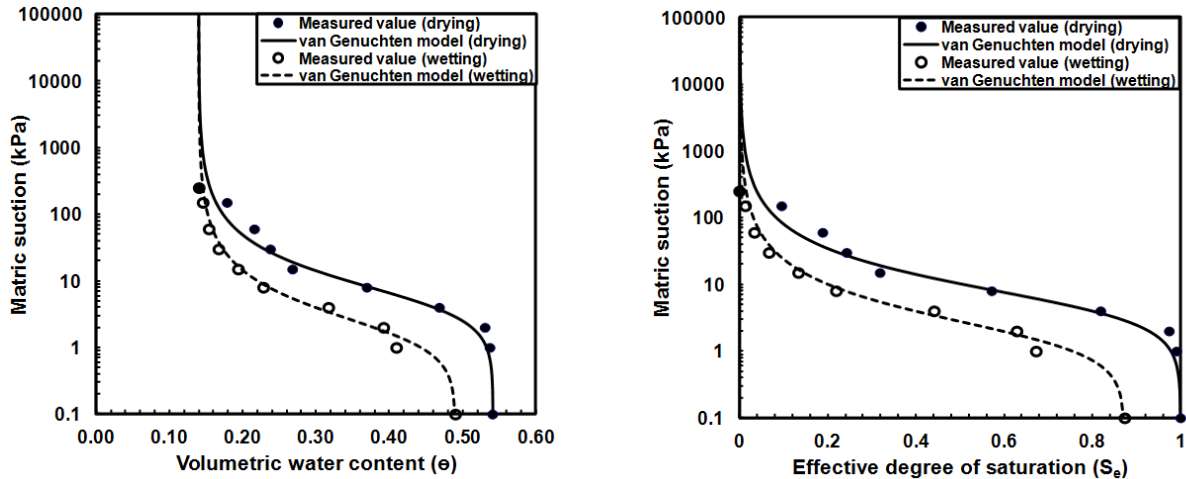


Fig. 5. Estimation of the saturated and residual water contents and AEV or WEV.

Fig. 6은 산성토의 건조 및 습윤과정에 따른 측정결과와 van Genuchten (1980) 방법으로 예측한 흡-함수특성곡선 (SWCC)을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 모관흡수력에서 건조과정의 체적함수비가 습윤과정의

체적함수비 혹은 유효포화도 보다 더 크게 나타났다. 이와 같이 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)이 일치하지 않는 현상을 이력현상(hysteresis)라고 한다. 이와 같은 이력현상의 원인으로는 잉크병 효과(Ink-bottle effect), 모세관 응축(capillary condensation), 갇힌 공기(entrapped air), 팽창 및 수축(swelling and shrinkage), 접촉각 이력현상(contact angle hysteresis)을 들 수 있다. 이 가운데 이력현상의 주요원인으로는 잉크병 효과를 들 수 있다. 잉크병 효과는 흙의 구조적 특징(간극의 크기, 형상 및 분포)이 비균질하기 때문에 발생하며, 비균질한 간극에서의 모세관을 고려함으로써 알 수 있다. 즉 물을 흡수하는 습윤과정에서는 큰 간극의 영향이 절대적이고, 물을 배수하는 건조과정에서는 작은 간극의 영향이 주요하기 때문이다(Lu and Likos, 2004).



(a) Relationship between matric suction and volumetric water contents (b) Relationship between matric suction and effective degree of saturation

Fig. 6. SWCCs in the drying and wetting paths.

불포화 투수계수함수 산정

보통 실험적인 방법으로 불포화토의 투수계수함수를 결정하기 어렵기 때문에 이론적인 방법을 선호하고 있다. 그 가운데 흡-함수특성곡선의 불포화 계수를 이용하여 투수계수함수를 추정하는 계수추정방법이 주로 사용되고 있다. 특히 Mualem (1976)의 모델을 기초로 한 van Genuchten (1980)의 투수계수함수 모델이 계수추정방법으로 가장 많이 이용되고 있다. 식 (2)는 van Genuchten (1980)이 제안한 불포화토의 투수계수함수 산정식을 나타낸 것이다.

$$k = k_s \times S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \tag{2}$$

여기서, k =불포화 투수계수, k_s =포화투수계수, S_e =유효포화도

$$m=1 - 1/n \quad (0 < m < 1)$$

Table 4는 산성토에 대한 건조 및 습윤과정에서의 포화투수계수를 나타낸 것이다. 이를 위하여 먼저 삼축압축시험장치를 이용하여 산성토의 포화투수계수를 측정하였다. 이 값을 토대로 van Genuchten (1980)이 제시한 불포화토의 투수계

수함수 산정식을 이용하여 건조 및 습윤과정에서 포화시 유효포화도를 투수계수함수 산정식에 입력하여 계산한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 건조과정에서의 포화투수계수는 습윤과정에서의 포화투수계수보다 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 4. Saturated hydraulic conductivities in the drying and wetting paths

Description	Drying path	Wetting path
Saturated hydraulic conductivity (cm/sec)	8.62×10^{-4}	1.67×10^{-4}

Fig. 7은 산성토의 모관흡수력과 불포화 투수계수의 관계를 나타낸 것이다. 또한 건조과정의 공기함입치와 습윤과정의 수분함입치를 함께 도시하였다. 그림에서 보는 바와 모관흡수력이 증가함에 따라 불포화 투수계수는 점차적으로 감소하다가 0에 수렴하는 것으로 나타났다. 건조과정의 불포화 투수계수는 모관흡수력이 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 습윤과정의 경우 불포화 투수계수는 모관흡수력이 낮은 수준일 경우 상대적으로 작게 감소하지만 수분함입치 직전에 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 건조 및 습윤과정에서의 불포화 투수계수함수는 흡-함수특성곡선에서와 동일하게 이력현상이 발생하는 것으로 나타났다.

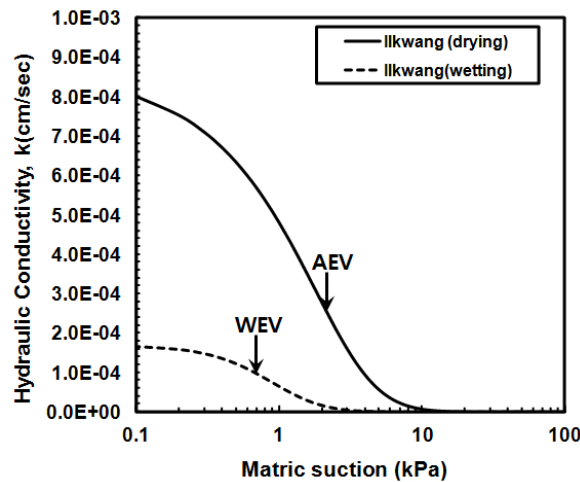


Fig. 7. Hydraulic Conductivity Functions in the drying and wetting paths.

결론

본 연구에서는 산성토를 대상으로 물리적 특성과 불포화 특성을 조사 및 분석하였다. 이를 위하여 먼저 부산 일광광산 주변의 산성토를 대상으로 물리적 특성을 조사하고, 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정장치를 이용하여 건조 및 습윤과정에 대한 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하였다. 그리고 계수예측방법 가운데 가장 널리 활용되고 있는 van Geunchten (1980) 모델을 적용하여 건조 및 습윤과정에 따른 산성토의 불포화 투수계수함수(HCF)를 산정하였다 이와 같이 산정된 산성토의 흡-함수특성곡선(SWCC)과 투수계수함수(HCF)를 이용하여 산성토의 불포화 특성을 고찰하였으며, 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 일광광산 주변 자연사면에서 채취된 산성토는 비중이 2.72, 소성지수는 9.89이며,현장의 건조단위중량은 1.246 t/m^3 이다. 또한 통일분류법(USCS) 상에서 실트질 모래(SM)로 구분된다.

2. 삼축압축시험장치를 이용하여 강제 투수방식으로 측정된 산성토의 포화투수계수는 8.62×10^{-4} cm/sec이며, van Genuchten (1980)에 의해 제안된 계수예측방법을 적용하여 불포화 투수계수함수를 산정하였다.
3. van Genuchten (1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정한 결과 유효포화도에 따른 모관흡수력은 S자 형태의 비선형적인 관계를 나타내며, 건조 및 습윤과정을 거치는 동안 동일한 체적함수비 혹은 유효포화도에서 다른 모관흡수력을 나타내는 이력현상이 발생되었다.
4. 산성토의 불포화 투수계수함수(HCF)는 건조과정의 경우 모관흡수력이 증가함에 따라 지속적으로 감소하지만 습윤과정의 경우 모관흡수력이 낮은 수준에서 상대적으로 작게 감소하고, 수분함입치 직전에 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 건조 및 습윤과정에서의 불포화 투수계수함수는 흡-함수특성곡선에서와 동일하게 이력현상이 발생되었다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “기후변화 적응 산사태 조기경보기술 및 지질환경재해 리스크 제어기술 개발 (18-3413)”과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Abu-Hejleh, A.N., Znicari, D., Illangasekare, T.H., 1993, Permeability determination for unsaturated soils, *Unsaturated soils*, GSP No.39, ASCE, Houston, S. and Wray, W. eds., 163-174.
- Buckingham, E., 1907, Studies on the movement of soil moisture, U.S. Dept. Agric. Bur. Soils Bull. 38, U.S. Government Publishing Office, Washington, DC.
- Childs, E.C., Collis-Geoge, N., 1950, The permeability of porous materials, *Proc. Royal Society, London, Series A*, 210, 392-405.
- Dane, J.H., Hruska, S. 1983, In-situ determination of soil hydraulic properties during leaching, *Soil Science Society of America Journal*, 47(4), 619-624.
- Hassler, G.L., Brunner, E., 1945, Measurement of capillary pressures in small core samples, *Petroleum Technology, Technical Paper*, 114-123.
- Hilf, J.W., 1956, An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils, *Technical Memorandum No.654*, U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, CO.
- Klute, A., 1972, The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils, *Soil Sci.*, 113(4), 264-276.
- Lu, N., Likos, W.J., 2004, *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York. 556p.
- Matyas, E.L., 1966, Air and water permeability of compacted soils, *Permeability and Capillary of Soils*, ASTM STP 417, 160-175.
- Mitchell, J.K., Younger, J.S., 1966, Abnormalities in hydraulic flow through fine-grained soils. *Permeability and Capillary of Soils*, ASTM STP 417, 106-141.
- Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Richards, L.A., 1931, Capillary conduction of liquids through porous medium, *Jour. Physics*, 1, 318-333.
- Song, Y.S., 2014 Suction stress in unsaturated sand at different relative densities, *Engineering Geology*, 176, 1-10.
- Song, Y.S., Hwang, W.K., Jung, S.J., Kim, T.H., 2012, A comparative study of suction stress between sand and silt under

unsaturated conditions, *Engineering Geology*, 124, 90-97.

Van Genuchten, M.Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.

Welge, H.J., 1952, A simplified method for computing oil recovery by gas or water drive, *Transactions AIME*, 195, 91-98.

Wildenschild, D., Jensen, K.H., Hollenbeck, K.J., Illangasekare, T.H., Znicari, D., Sonnenborg, T., Butts, M.B., 1997, A two-stage procedure for determining unsaturated hydraulic characteristics using a syringe pump and outflow observations, *Soil Science Society of America Journal*, 61, 347-359.

Zachman, D.W., Duchateau, P.C., Klute, A., 1981, The calibration of the Richards flow equation for a draining column by parameter identification, *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1012-1015.