

새만금지역 준설토의 불포화 특성에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Unsaturated Characteristics of Dredging Soils at Saemangeum Area

송 영 석¹ Song, Young-Suk
유 승 경^{2*} You, Seung-Kyong

ABSTRACT

The matric suction and volumetric water content of dredging soils obtained from Saemangeum area were measured by the automated Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) apparatus under both drying and wetting conditions. Based on the test result, SWCCs of the dredging soils were estimated by the van Genuchten(1980) model. The matric suction of drying process is larger than that of wetting process at a same effective degree of saturation. The suction stresses for various matric suctions were estimated using Lu and Likos (2006) model and the Suction Stress Characteristic Curves (SSCC) were predicted using the independent parameter of SWCC. The suction stress of drying path was increased and decreased, while the suction stress of wetting path was continuously decreased with increasing the effective degree. Also, the suction stress of drying path is larger than that of wetting path at a same effective degree of saturation. The Hydraulic Conductivity Function (HCF) was also predicted by the van Genuchten (1980) model. The hydraulic conductivity was increased with increasing the volumetric water content. The hydraulic conductivity of drying path is larger than that of wetting path at a same matric suction. According to the results of SWCCs and SSCCs, the hysteresis phenomenon of suction stress or matric suction during both drying and wetting paths was occurred. The main reason of hysteresis phenomenon is a ink bottle effect of water among soil particles.

요 지

본 연구에서는 자동 흡·함수특성곡선 시험장치를 이용하여 새만금지역에서 채취한 준설토의 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 측정결과를 토대로 Van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡·함수특성곡선(SWCC)을 산정하였다. 동일한 유효포화도에서 건조과정의 모관흡수력은 습윤과정의 모관흡수력보다 크게 나타났다. Lu and Likos(2006)의 방법을 이용하여 모관흡수력에 따른 흡입응력을 산정하고, 흡·함수특성곡선(SWCC)의 불포화 관련계수를 토대로 흡입응력특성곡선(SSCC)을 예측하였다. 건조과정의 흡입응력은 유효포화도가 증가함에 따라 증가하다가 감소하지만 습윤과정의 흡입응력은 유효포화도가 증가함에 따라 지속적으로 감소한다. 또한 동일한 유효포화도에서 건조과정의 흡입응력은 습윤과정의 흡입응력보다 크게 나타났다. 한편 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 투수계수함수(HCF)를 예측하였다. 체적함수비가 증가함에 따라 불포화 투수계수는 증가하며, 동일한 모관흡수력에서 건조과정의 투수계수가 습윤과정의 투수계수보다 크게 나타났다. 흡·함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)의 산정결과에 의하면 건조 및 습윤과정에서 흡입응력 혹은 모관흡수력에 대한 이력현상이 발생되었다. 이러한 이력현상은 흡입자 사이의 간극수로 인한 잉크병 효과에 의한 것이다.

Keywords : Dredging soil, Suction stress, Matric suction, Soil water characteristics curve (SWCC), Suction stress characteristics curve (SSCC)

1 정회원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

2* 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Myongji College, E-mail: yousk@mjc.ac.kr)

1. 서론

최근 들어 지반공학 분야에 있어 불포화토에 대한 관심이 증가하고 있으며, 불포화토의 강도정수 산정, 불포화지반의 해석기법 개발 등에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 왜냐하면 고전적인 포화토의 이론으로 실제 불포화 상태로 존재하는 지반의 거동을 합리적으로 해석 및 예측하기 어려우며, 이로 인하여 많은 문제점이 발생하였기 때문이다(Fredlund and Rahardjo, 1993; Lu and Likos, 2004).

불포화토는 건조토(dry soil)와 포화토(saturated soil)의 중간영역으로서 부분적으로 포화된 흙(partially saturated soil)으로 표현하기도 한다. 이러한 불포화토는 고전적인 포화토의 이론으로는 설명할 수 없는 다른 거동특성을 보인다. 따라서 불포화 지반의 거동을 이해하기 위해서는 흙함수특성곡선, 불포화 투수계수, 불포화 전단강도 등과 같은 불포화 지반정수를 정확하게 산정하는 것이 가장 중요하다. 현재까지의 불포화토에 대한 연구에서도 주로 불포화 지반정수의 산정과 이를 활용한 지반거동 해석이 주를 이루고 있다(Jennings and Burland, 1962; Fredlund and Morgenstern, 1977; Fredlund et al., 1978; Lu and Likos, 2006; Lu et al., 2007, 2009; Chae et al., 2010; Kim and Kim, 2010).

불포화토의 특성을 규명하기 위한 가장 기본적인 요소 중의 하나가 흙함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)을 산정하는 것이다. 흙함수특성곡선은 모관흡수력과 포화도 혹은 체적함수비 사이의 관계로 정의할 수 있다. 이는 불포화토 고유의 물성을 나타내며, 비선형적인 관계를 갖는다. 대표적인 흙함수특성곡선은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 흙함수특성곡선은 모관흡수력의 단계에 따라 세 개의 영역으로 구분할 수 있다. 흙이 포화상태로부터 공기침투압이 발생하는 시점까지가 capillary fringe(capillary)영역이고, 공기침투가 발생된 시점부터 잔류함수비 발생 시점까지가 continuous capillary(funicular)영역, 잔류함수비 발생 이후부터가 residual(pendular)영역이다(Lu and Likos, 2004).

모관흡수력과 포화도의 상관관계를 토대로 불포화토의 응력상태를 평가할 수 있는 흡입응력(suction stress)을 산정할 수 있다. Lu and Likos(2006)는 흡입응력을 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의하였다. 그리고 흡입응력은 모관흡수력 혹은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되며,

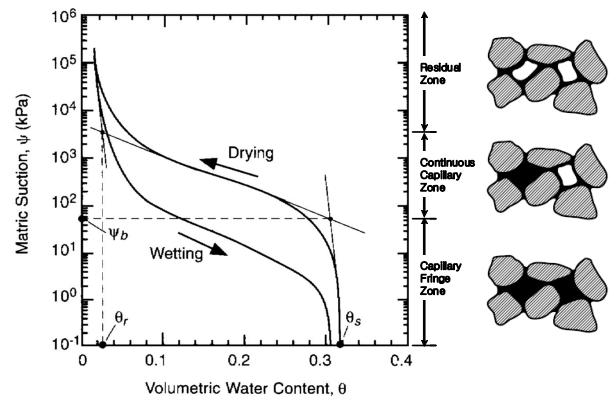


그림 1. Typical soil-water characteristics curve (modified the Figure from Lu and Likos, 2004)

이를 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curve, SSCC)이라고 제안하였다. 흡입응력특성곡선은 불포화토의 응력상태를 평가하는 중요한 지표로 사용할 수 있으며, 함수량에 따른 지반의 강도를 예측 및 평가할 수 있다.

본 연구의 목적은 새만금지역의 준설토로 시공된 각종 토목구조물(제방, 성토사면 등)에 대한 강우시 안정성 평가를 위하여 적용될 불포화토의 특성치를 산정하기 위한 것이다. 국내의 경우 주로 풍화토의 불포화 특성에 대한 연구가 주로 수행되어 왔으나 준설토에 대한 연구는 매우 미흡한 편이다.

본 연구에서는 새만금지역(새만금 방수제 동진 5공구 현장)에서 채취된 준설토의 불포화특성을 조사하기 위하여 흙함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정하고, 불포화 투수계수함수(HCF)를 예측하고자 한다. 이를 위하여 먼저 자동 흙함수특성곡선 시험장치를 이용하여 준설토에 대한 모관흡수력과 체적함수비를 측정한다. 측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흙함수특성곡선(SWCC)을 산정한다. 흙함수특성곡선(SWCC)으로부터 구한 불포화 관련계수를 이용하여 Lu and Likos(2006)의 방법으로 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정하고, van Genuchten(1980)의 방법으로 불포화 투수계수함수(HCF)를 산정하고자 한다.

2. 시험방법 및 재료

2.1 시험장치 및 방법

본 연구에서는 새만금지역에서 채취한 준설토의 흙함수특성곡선을 산정하기 위하여 자동 흙함수특성곡선 시

험장치를 활용하였다(송영석 등, 2010). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화도의 흡-함수특성곡선을 산정할 수 있다.

그림 2는 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울, 시료준비장치, 측정시스템 등으로 구성되어 있다. 그리고 공기의 압력은 0-300kPa범위까지 적용할 수 있으며, 축변환기법(Hilf, 1956)을 도입하였다.

그림 3은 본 시험장치의 계통도를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저 압력조절장치에 의해 조절 및 계획된 공기압을 흡시료에 가해지게 된다. 공기압에 의해 포화된 시료내 간극수가 빠져나가게 되며, 이러한 간극수는 HAE(High Air Entry) 디스크와 공기방울트랩을 거쳐 저울을 통하여 측정된다. HAE 디스크는 공기와 흡입자들이 이동하는 것은 제한하지만 물의 흐름을 제한하지 않는다. 이때 공기압은 흡시료의 모관흡수력으로 작용하게 되며, 흡시료가 가지는 일정한 공기함입치를

넘어서게 되면 흡시료 내부에 있는 간극수가 빠져나오기 시작한다. 본 실험에서는 모래의 경우 1 bar, 실트의 경우 3 bar의 공기침입값을 갖는 HAE 디스크를 이용하였다.

저울은 컴퓨터와 연결되어있으며 가해진 공기압과 측정된 간극수의 무게는 SWRC(Soil Water Retention Curve) 프로그램을 통해 실시간으로 확인 및 저장이 가능하다. 본 프로그램을 통하여 실시간으로 간극수의 유출입을 그림을 통하여 보여줌으로써 다음 단계의 공기압을 가하는 시점을 정확하게 알 수 있다. 그리고 일정 공기압에서 간극수의 유출입이 수렴되는 과정을 실시간으로 확인할 수 있으며, 약 2시간 정도 간극수의 유출입이 없을 경우 다음 단계의 공기압을 재하 및 제하하였다. 따라서 이를 통하여 공기압을 단계별로 증가시켜 흡시료내 간극수를 배출시킴으로서 건조과정에 대한 함수특성을 나타낼 수 있으며 반대로 공기압을 단계별로 감소시켜 흡시료내 간극수를 유입시킴으로서 습윤과정의 대한 함수특성을 나타낼 수 있다. 이러한 결과를 이용하여 건조과정 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선을 도출할 수 있으며, 불포화도의 특성치를 산정할 수 있다.

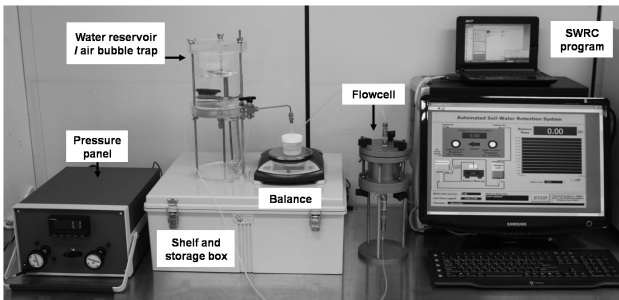


그림 2. Automated SWCC apparatus(송영석 등, 2010)

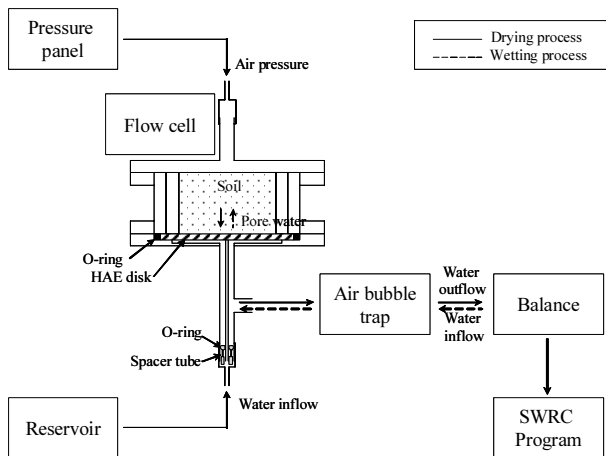


그림 3. Conceptual diagram of the automated SWCC apparatus (송영석 등, 2010)

2.2 시험재료

본 연구에서는 새만금지역에서 채취한 준설토를 이용하여 시험을 수행하였다. ASTM D 4254-83 및 ASTM D 4254-83 시험기준에 의거하여 각 시료에 대한 최대 및 최소건조밀도를 측정하고 동일한 상대밀도 조건($D_r=75\%$)으로 시료를 성형하였다.

시료를 성형하기 위하여 플라스틱 몰드(직경 5.05cm, 높이 3.89cm)와 플라스틱 봉을 이용하여 3층 다짐을 실시하였다. 그리고 시료 상하부에 다공석을 두어 포화시 시료 내부에 물이 원활하게 흐를 수 있도록 하였다. 시료를 포화시키기 위하여 데시케이터와 진공펌프를 활용하였다. 즉 데시케이터 내에 정제된 증류수를 채우고, 성형된 시료를 약 2/3정도 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, 실트 및 점토의 경우 약 24시간 이상을 두면 시료가 포화된다(송영석 등, 2010).

이와 같이 성형된 시료는 포화를 시킨 후 자동 흡-함수

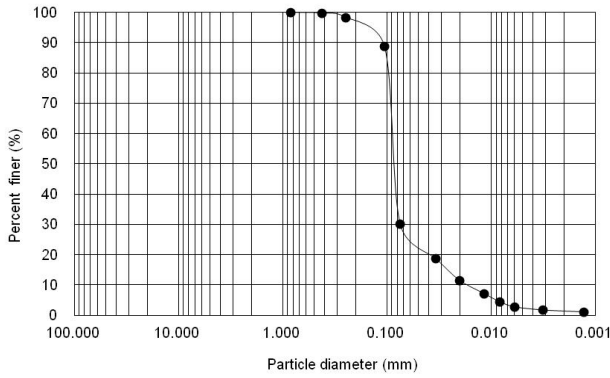


그림 4. Grain size distribution curves of the dredging soils

표 1. Physical soil properties of the dredging soils

Description	Symbol	Dredging soils	
Specific gravity	G_s	2.69	
Max. void ratio	e_{max}	1.45	
Min. void ratio	e_{min}	0.69	
Void ratio at $D_r=75\%$	$e_{75\%}$	0.88	
Max. dry density	γ_{dmax}	(g/cm ³)	
Min. dry density	γ_{dmin}		1.59
Effective particle size	D_{10}	(mm)	
Particle size of D_{30}	D_{30}		0.01
Particle size of D_{60}	D_{60}		0.03
Uniformity coefficient	C_u	8.09	
Coefficient of curvature	C_c	1.15	

특성곡선 시험장치를 이용하여 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 그림 4는 새만금지역에서 채취한 준설토의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 그리고 표 1은 새만금지역에서 채취한 준설토에 대한 기본적인 물리적 특성을 측정한 결과이다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 시험결과

자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 준설토의 모관흡수력과 간극수량을 측정하였다. 즉, 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출하는 과정과 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 과정을 재현하였다. 이때 일정단계의 모관흡수력 수준에서 간극수 배출 및 유입이 수렴된 이후, 다음단계의 모관흡수력을 재하 혹은 제하하였다. 그림 5는 준설토의 건조 및 습윤과정시 모관

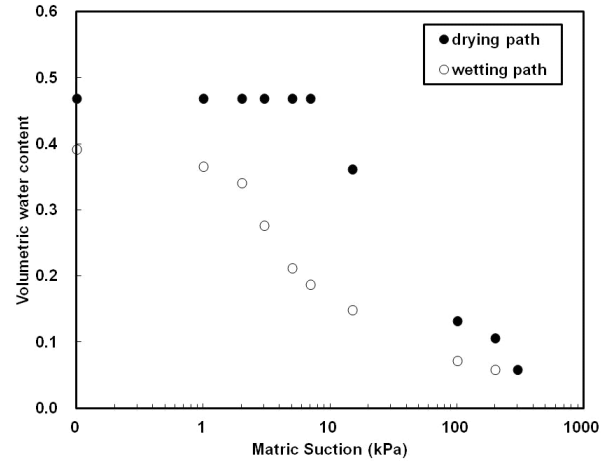


그림 5. Relationship between the matric suction and the volumetric water content

흡수력과 체적함수비의 관계를 도시한 것으로서 모관흡수력이 증가함에 따라 체적함수비는 감소하는 것으로 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 건조 및 습윤과정을 거치는 동안 동일한 체적함수비에서 모관흡수력이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상을 이력현상(hysteresis)이라고 하며, 원인은 잉크병 효과, 접촉각 효과 등에 의한 것이다. 잉크병 효과는 흙의 구조적 특성(간극의 크기, 형상 및 분포)이 비균질하기 때문에 발생한다. 물을 흡수하는 습윤과정에서는 큰 간극의 영향이 절대적이고 물을 배수하는 건조과정에서는 작은 간극이 영향을 미친다. 또한, 고체-액체-기체 경계면에서 습윤시의 고체-액체간 접촉각은 실질적으로 건조시의 접촉각 보다 더 크다. 그러므로 불포화토의 건조 및 습윤과정에서 흡입자와 물의 접촉각은 상당한 차이를 보인다.

3.2 흡-함수특성곡선(SWCC) 산정

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

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

표 2. Independent parameters of unsaturated soils under drying and wetting conditions

Condition	a (kPa ⁻¹)	n	m	AEV (kPa)
Drying	0.05	2.08	0.52	8.50
Wetting	0.38	1.87	0.47	

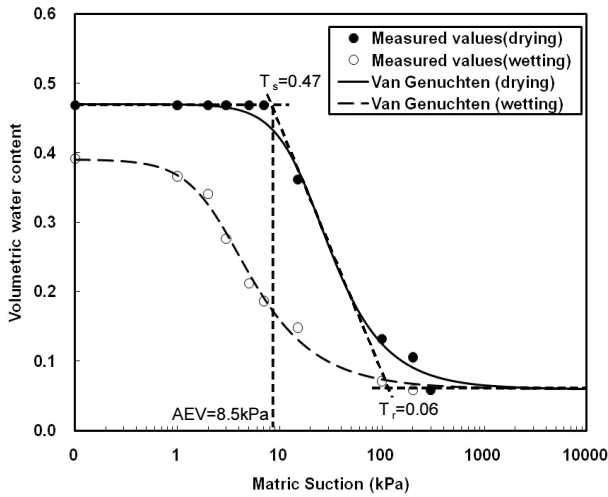


그림 6. SWCCs estimated by the van Genuchten model

여기서, S_e 는 유효포화도, 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.

표 2는 준설토의 건조 및 습윤과정에 대한 불포화 계수를 산정한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 공기유입값과 관계된 계수 α 는 습윤과정에서 더 큰 값을 가지며, 변곡점의 경사에 관련된 계수 n 과 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 건조과정에서 더 큰 값을 가진다. 표에 나타난 불포화 계수를 이용하여 새만금지역에서 채취한 준설토의 흡-함수특성곡선을 도출할 수 있다.

그림 6은 건조 및 습윤과정에 대한 준설토의 흡-함수특성곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선은 S자 모양의 비선형적인 관계를 나타내고 있으며, 건조과정의 모관흡수력이 습윤과정의 모관흡수력보다 동일한 포화도에서 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. 그리고 공기흡입치는 8.50kPa이며, 포화체적함수비(θ_s)는 0.47이고, 잔류체적함수비(θ_r)는 0.06이다. 또한 건조과정과 습윤과정의 흡-함수특성곡선이 일치하지 않는 이력현상을 볼 수 있다.

3.3 흡입응력특성곡선(SSCC) 산정

Lu and Likos(2004, 2006)에 의하면 모관흡수력은 간극 내 물과 공기의 접촉면에서 발생하므로 독립적인 응력변수로 정의할 수 없으므로, Bishop(1959)의 유효응력 접근법이 합리적이라고 하였다. 그리고 식 (2)에서 보는 바와 같이 Bishop(1959)의 이론을 토대로 불포화 전단강도에 흡입응력(suction stress) 개념을 도입하고, Mohr-Coulomb 파괴규준으로 확장하였다. 식 (3)에서 σ^s 는 흡입응력으로서 입자상호간에 발생하는 물리화학적 응력, 표면장력에 의한 모관응력, 흡구조에 따른 응력을 고려하였다. 그리고 식 (3)에서 보는 바와 같이 흡입응력은 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의할 수 있으므로 흡-함수특성곡선에서의 면적을 의미한다. 그러므로 흡입응력은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되며, 이를 흡입응력특성곡선(SSCC)이라고 한다.

$$\begin{aligned} \tau_f &= c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \chi(u_a - u_w)\tan\phi' \\ &= c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + S_e(u_a - u_w)\tan\phi' \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w)S_e = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (3)$$

여기서, τ_f 는 파괴시 전단강도, c' 는 유효점착력, ϕ' 는 유효내부마찰각, σ' 는 유효응력, χ 는 Bishop(1954)의 유효응력계수, 그리고 σ^s 는 흡입응력이다.

본 연구에서는 준설토의 흡-함수특성곡선을 예측하기 위한 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡입응력 특성곡선의 상관식을 유도하였다. van Genuchten(1980)은 유효포화도와 모관흡수력의 관계를 식 (1)과 같이 제안하였으며, 이를 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (4)과 같이 유효포화도 혹은 유효체적함수비에 따른 흡입응력 산정식을 구할 수 있다(Lu et al., 2010).

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)S_e = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} \quad (4)$$

그림 7과 8은 준설토에 대한 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선으로부터 측정된 불포화도 관련계수(α , n)와 식 (4)를 이용하여 모관흡수력 및 유효포화도에 따른

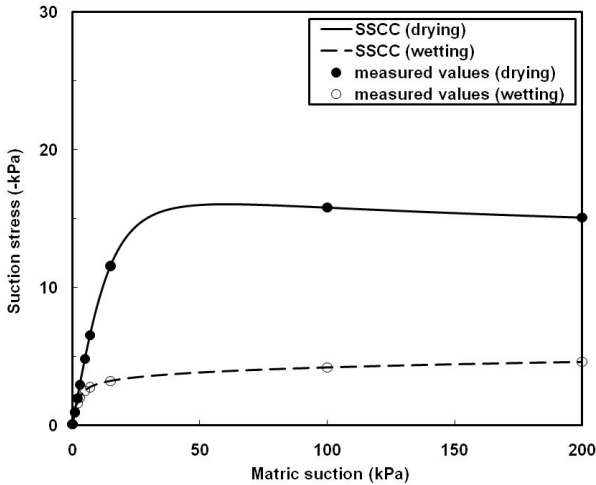


그림 7. Relationship between matric suction and suction stress

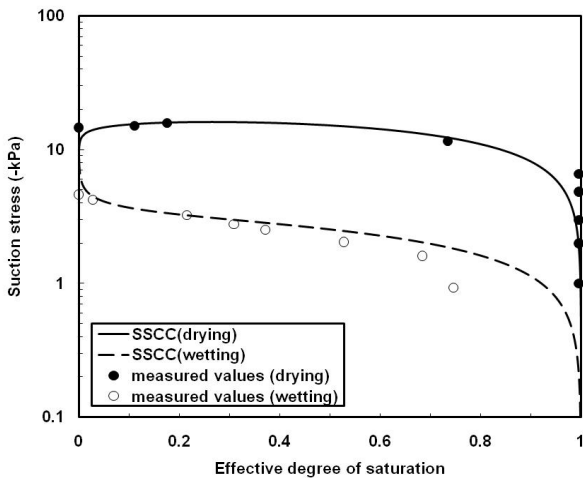
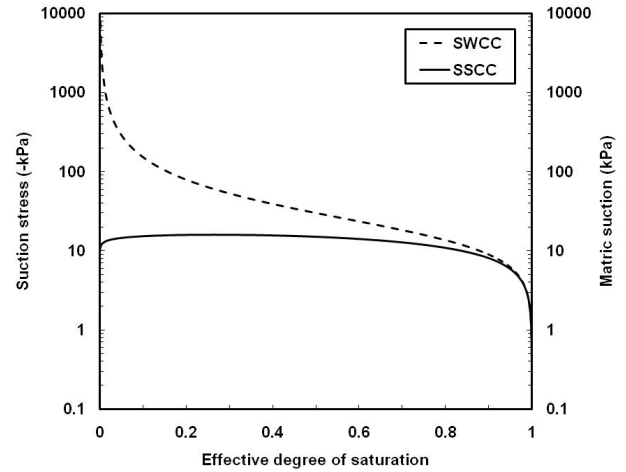
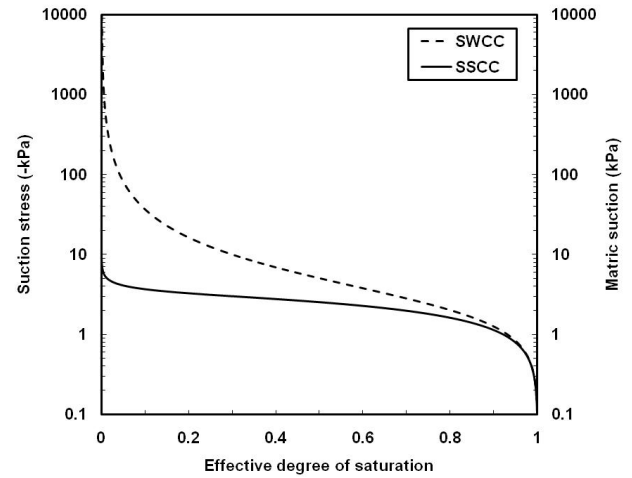


그림 8. Suction Stress Characteristics Curves of dredging soil

흡입응력을 산정한 결과이다. 그림 7은 모관흡수력과 흡입응력의 상관관계를 나타낸 것으로 건조과정의 흡입응력은 습윤과정의 흡입응력보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 모관흡수력에 따른 흡입응력은 건조 및 습윤과정에서 다른 경향을 갖는 것으로 나타났다. 즉, 건조과정의 경우 모관흡수력이 60kPa일 때 까지 흡입응력은 증가하다가 이후 미소하게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 습윤과정의 경우 모관흡수력이 증가함에 따라 흡입응력은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 한편 그림 8은 유효포화도와 흡입응력의 상관관계로 부터 흡입응력특성곡선(SSCC)을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 낮은 유효포화도에서의 흡입응력은 건조 및 습윤과정에서 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다. 낮은 유효포화도에서 흡입응력은 건조과정의 경우 증가하다가 감소하지만 습윤과정의 경우 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이



(a) Drying path



(b) Wetting path

그림 9. Comparison between SWCC and SSCC for dredging sand

후 유효포화도가 증가함에 따라 흡입응력은 지속적으로 감소하다가 약 90%이후 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 건조 및 습윤과정을 거치는 동안 동일한 체적함수비에서 다른 흡입응력을 나타내는 이력현상(hysteresis)이 발생되었다. 이는 흡-함수특성곡선(SWCC)에서의 모관흡수력에 대한 이력현상에 기인한 것으로 판단된다.

그림 9는 준설토의 건조 및 습윤과정에서 측정된 흡입수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡입수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)은 유사한 형태를 보이고 있다. 동일한 유효포화도에서 모관흡수력은 흡입응력보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났으며, 유효포화도가 작을수록 그 차이는 점차 증가함을 알 수 있다. 그리고 유효포화도가 약 10%이하에서는 건조과정의 흡입응력은 감소하는 경향을 보이거나, 습윤과정의 흡입응력은 증가하는 경

향을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 유효포화도가 커질수록 흡입응력과 흡입응력과 모관흡수력의 차이는 점차 감소하며, 포화에 가까워 질 경우 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다.

준설토 지반의 경우 지반내 물이 유입되면서 흡입응력은 지속적으로 감소하므로 유효응력도 지속적으로 감소하게 됨을 알 수 있다. 따라서 준설토 지반의 설치된 성토사면의 경우 강우시 급격한 사면붕괴보다는 지반내 물이 유입되면서 유효응력이 지속적으로 감소되는 진행성 사면붕괴를 유발하게 될 것이다.

3.4 투수계수함수(HCF) 예측

실험적인 방법으로 불포화토의 투수계수함수를 결정하기 어렵기 때문에 일반적으로 이론적인 방법을 활용하고 있다. 그 가운데 흙-함수특성곡선의 불포화 계수를 이용하여 투수계수함수를 추정하는 계수추정방법이 주로 사용되고 있다. 특히 van Genuchten (1980)의 투수계수함수 모델이 계수추정방법으로 가장 많이 이용되고 있다. 식 (5)는 van Genuchten (1980)이 제안한 불포화토의 투수계수함수 산정식을 나타낸 것이다.

$$k = k_s \times S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (5)$$

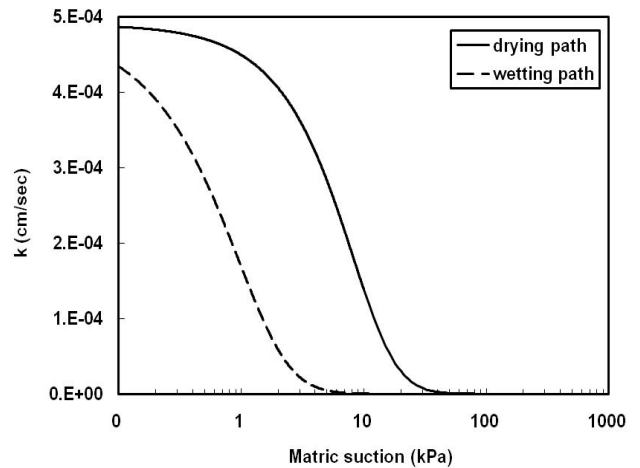
여기서, k =불포화 투수계수, k_s =포화투수계수, S_e =유효포화도, $m=1 - 1/n$ ($0 < m < 1$)

표 3은 van Genuchten (1980)의 불포화토의 투수계수함수 산정식을 이용하여 준설토의 건조 및 습윤과정의 포화투수계수를 나타낸 것이다. 이를 위하여 먼저 투수시험을 통하여 준설토의 포화시 투수계수를 측정하였다. 이 값을 토대로 건조 및 습윤과정의 포화시 유효포화도를 투수계수함수 산정식에 입력하여 계산하였다. 표에서 보는 바와 같이 건조과정에서의 포화투수계수는 습윤과정에서의 포화투수계수보다 크게 나타남을 알 수 있다.

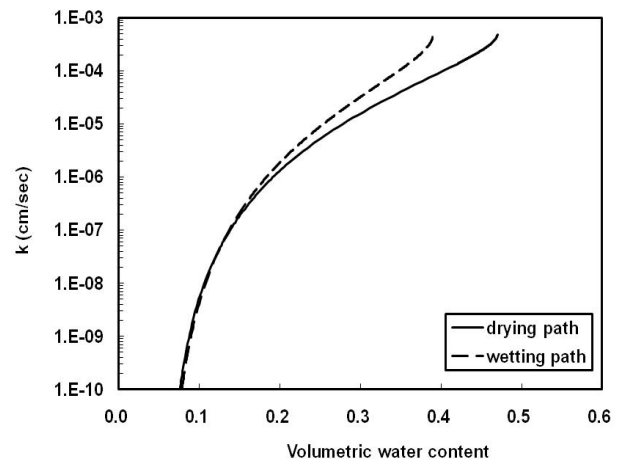
표 3. Coefficient of permeability in saturated soil under drying and wetting conditions

Condition	k_s (cm/sec)
Drying	4.87×10^{-4}
Wetting	4.34×10^{-4}

그림 10은 준설토의 불포화 투수계수함수를 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 불포화 투수계수와 모관흡수력의 관계를 나타낸 것으로 불포화 투수계수는 건조과정의 경우가 습윤과정의 경우보다 크게 발생됨을 알 수 있다. 그리고 모관흡수력이 증가함에 따라 불포화투수계수는 감소하는 경향을 갖는다. 한편 그림 10(b)는 불포화 투수계수와 체적함수비의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 체적함수비가 증가함에 따라 불포화 투수계수는 증가하는 경향을 보인다. 그리고 낮은 체적함수비(0.15이하)에서 건조 및 습윤과정의 투수계수는 유사하게 나타나지만 이후 동일한 체적함수비에서 습윤과정의 투수계수가 건조과정의 투수계수보다 크게 나타남을 알 수 있다.



(a) Relationship between hydraulic conductivity and matric suction



(b) Relationship between hydraulic conductivity and volumetric water content

그림 10. Hydraulic Conductivity Functions of unsaturated dredging soil

4. 결론

본 연구에서는 새만금지역에서 채취한 준설토의 불포화특성을 조사하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 준설토에 대한 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 측정결과를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하고, 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정하였다. 그리고 van Genuchten (1980)의 방법으로 불포화 투수계수함수(HCF)를 예측하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 새만금지역(새만금 방수제 동진 5공구 현장)에서 채취된 준설토의 공기함입치는 8.50kPa이며, 포화체적함수비(θ_s)는 0.47이고, 잔류체적함수비(θ_r)는 0.06이다. 준설토의 불포화관련 계수는 건조과정의 경우 α 는 0.054, n 은 2.084, m 은 0.520이며, 습윤과정의 경우 α 는 0.382, n 은 1.869, m 은 0.465로 산정되었다.
- (2) 건조과정의 흡입응력은 유효포화도가 증가함에 따라 증가하다가 감소하지만 습윤과정의 흡입응력은 유효포화도가 증가함에 따라 지속적으로 감소한다. 따라서 유효포화도가 증가함에 따라 대체적으로 흡입응력은 감소하며 유효응력도 지속적으로 감소하게 됨을 알 수 있다.
- (3) 준설토의 경우 동일한 유효포화도에서 모관흡수력은 흡입응력보다 크고, 유효포화도가 커질수록 흡입응력과 모관흡수력의 차이는 점차 감소하며 포화에 가까워질 경우 동일한 값을 갖는다.
- (4) 준설토의 불포화 투수계수는 동일한 모관흡수력 조건에서 건조과정의 경우가 습윤과정의 경우보다 크게 발생되며, 모관흡수력이 증가함에 따라 투수계수는 감소한다. 그리고 체적함수비가 증가함에 따라 불포화 투수계수는 증가하는 경향을 보인다.
- (5) 건조 및 습윤과정에서 유효포화도에 따라 서로 다른 모관흡수력 혹은 흡입응력을 나타내는 이력현상이 발생됨을 알 수 있다. 모관흡수력 혹은 흡입응력의 이력현상은 흙의 구조적 특징으로 인한 잉크병 효과에 의한 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bishop, A. W. (1954), "The use of pore water coefficients in practice", *Geotechnique*, Vol.4, pp.148-152.
2. Bishop, A. W. (1959), "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknisk*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
3. Chae, J. G., Kim, B. S., Park, S. W. and Kato, S. (2010), "Effect of suction on unconfined compressive strength in partly saturated soils", *Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol.14, No.3, pp.281-290.
4. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), "Stress Variables for Unsaturated Soils", *Jour. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol.103, pp.447-466.
5. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley and Sons Inc., New York.
6. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, D. A. (1978), "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.3, pp.313-321.
7. 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, Colorado.
8. Jennings, J. E. B. and Burland, J. B. (1962), "Limitation to the use of effective stresses in unsaturated soils", *Geotechnique*, Vol.12, pp.125-144.
9. Kim, C. K. and Kim, T. H. (2010), "Behavior of unsaturated weathered residual granite soil with initial water contents", *Engineering Geology*, Vol.113, pp.1-10.
10. Lu, N. and Likos, W. J. (2004), *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley and Sons Inc., New York.
11. Lu, N., Godt, J. W. and Wu, D. T. (2010), "A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil", *Water Resources Research*, Vol.46, No.W05515, doi:10.1029/2009WR 008646.
12. Lu, N. and Likos, W. J. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil", *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.2, pp.131-142.
13. Lu, N., Kim, T. H., Sture, S. and Likos, W. J. (2009), "Tensile strength of unsaturated sand", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.135, No.12, pp.1410-1419.
14. Lu, N., Wu, B. and Tan, C. P. (2007), "Tensile strength characteristics of unsaturated soils", *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, ASCE, Vol.133, No.2, pp.144-154.
15. Mualem, Y. (1976), "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.513-522.
16. van Genuchten, M. T. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
17. 송영석, 이남우, 황웅기, 김태형 (2010), "자동 흡-함수특성곡선 시험장치 구축 및 활용", *지질공학*, 제20권, 제3호, pp.281-295.

(논문접수일 2011. 8. 7, 심사완료일 2011. 9. 12)