

주문진 표준사의 상대밀도에 따른 불포화 투수계수함수 산정

송영석*

Song, Young-Suk*

Estimation on Unsaturated Hydraulic Conductivity Function of Jumoonjin Sand for Various Relative Densities

ABSTRACT

The Soil-Water Characteristics Curve (SWCC) is affected by the initial density of soil under unsaturated condition. Also, the characteristic of hydraulic conductivity is changed by the initial density of soil. To study the effect of initial density of unsaturated soil, SWCC and the Hydraulic Conductivity Function (HCF) of Jumoonjin sand with various relative densities, 40%, 60% and 75% were measured in both drying and wetting processes. As the results of SWCC estimated by van Genuchten (1980) model, the parameter related to Air Entry Value(AEV), α in the wetting process is larger than that in drying process, but the parameters related to the SWCC slope, n and the residual water content, m are larger than those in wetting process. The AEV is increased or Water Entry Value (WEV) is decreased with increasing the relative density of sand. The AEV is larger than the WEV at the same relative density of sand. As the results of HCF estimated by van Genuchten (1980) model which is one of the parameter estimation methods, the unsaturated hydraulic conductivity maintained at a saturated one in the low level of matric suctions and then suddenly decreased just before the AEV or the WEV. The saturated hydraulic conductivity in drying process is larger than that in wetting process. The saturated hydraulic conductivity is decreased with increasing the relative density of sand in both drying and wetting processes. Also, the hysteresis in unsaturated HCFs between drying and wetting process was occurred like the hysteresis in SWCCs. According to the test results, the AEV on SWCC is decreased and the saturated hydraulic conductivity is increased with increasing the initial density. It means that SWCC and HCF are affected by the initial density in the unsaturated soil.

Key words : Unsaturated hydraulic conductivity function, Parameter estimation method, Jumoonjin sand, Relative density, Initial void ratio

초 록

불포화 조건에서 흙의 초기 밀도에 따라 흡·함수특성곡선이 변화시키게 되며, 이로 인하여 불포화 조건에서 투수특성도 변화하게 된다. 이에 대한 영향을 고찰하기 위하여 상대밀도 40%, 60% 및 75%의 주문진 표준사에 대한 건조 및 습윤과정에서의 흡·함수특성곡선(SWCC)과 불포화 투수계수함수를 산정하였다. van Genuchten (1980)의 방법을 이용하여 흡·함수특성곡선(SWCC)을 산정한 결과 공기유입값과 관계된 계수 α 는 습윤과정에서 더 큰 값을 가지며, 변곡점의 경사에 관계된 계수 n 과 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 건조과정에서 더 큰 값을 갖는다. 그리고 상대밀도가 증가할수록 공기함입치는 증가하지만 수분함입치는 감소하며, 동일한 상대밀도에서 공기함입치는 수분함입치보다 크게 발생된다. 한편, 계수추정방법 가운데 하나인 van Genuchten (1980)의 방법을 적용하여 불포화 투수계수함수를 산정한 결과 불포화 투수계수는 포화시 투수계수로 일정하게 유지되다가 공기함입치 혹은 수분함입치 직전에 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 건조과정에서의 포화투수계수는 습윤과정에서의 포화투수계수보다 크게 나타나며, 상대밀도가 증가함에 따라 건조 및 습윤과정에서의 포화투수계수는 감소한다. 실험결과에 의하면 주문진 표준사의 초기 간극비에 따라 흡·함수특성곡선(SWCC)에서의 공기함입치(AEV)는 감소하고 포화투수계수는 증가하므로, 흡·함수특성곡선(SWCC)과 불포화 투수계수함수(HCF)는 초기 간극비에 영향을 받는 것으로 나타났다.

검색어 : 불포화 투수계수함수, 계수추정방법, 이력현상, 주문진 표준사, 초기 상대밀도

* 정회원 · 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources · yssong@kigam.re.kr)

Received January 2, 2013/ revised June 28, 2013/ accepted August 13, 2013

1. 서론

일반적으로 지반공학적 문제에서 완전포화된 지반의 경우 유체의 흐름은 물의 흐름만으로 한정되며, 이러한 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따르는 것으로 알려져 있다. 그러나 불포화토내에서 흐름의 경우 물, 공기 그리고 흡입자의 3상 구조이므로 물과 공기의 흐름을 동시에 고려하여야 한다.

불포화토에서 물의 흐름을 이해하는데 가장 중요한 상관관계는 흡수함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)이다. 흡수함수특성곡선(SWCC)은 간극의 크기 및 모양의 분포, 비표면적, 입도분포, 물리화학적 특성, 밀도 심지어 온도에 영향을 받는다. 특히 흡의 밀도 혹은 간극비는 흡수함수특성곡선(SWCC)에 영향을 미치는 매우 중요한 요소 가운데 하나이다. 흡의 밀도 혹은 간극비는 현재 응력 및 흡수력(suction) 조건 뿐만 아니라 과거의 응력 및 흡수력 이력에 의해 크게 변화될 수 있다. Assouline (2006)에 의하면 흡의 밀도 변화는 흡수함수특성곡선(SWCC)의 변화에 이르게 하며, 이러한 흡의 밀도 변화는 자연토의 일반적인 특징이다. 흡의 밀도에 따른 흡의 투수특성 변화에 대한 연구는 Croney and Coleman (1954)에 의해 처음 시작되었으며, 이후 Laliberte et al. (1966)에 의해 지속되었다. 최근에는 흡의 밀도에 따른 불포화토의 투수특성에 대한 연구가 많이 수행되어지고 있다. 예를 들면, Gallipoli et al. (2003)은 van Genuchten (1980)에 의해 제안된 흡수함수특성곡선 함수에 비체적(specific volume)의 항을 포함하여 제안하였다. Sun et al. (2008)은 흡의 체적변화 혹은 모관흡수력의 변화에 의해 야기될 수 있는 포화도의 변화에 대한 투수모델을 제안하였다. Masin (2010)은 유효응력의 원리를 이용하여 간극비에 대한 포화도의 의존성을 예측할 수 있는 투수모델을 제안하였다. Tarantino (2009)는 수분비(water ratio)에 대한 경험적 공식을 토대로 변형될수 있는 흡에 대한 흡수함수특성곡선 함수를 제안하였다. 이 모델은 Gallipoli et al. (2003)에 의해 제안된 모델과 매우 유사하지만, Gallipoli et al. (2003)의 모델보다 1개의 파라메타가 작다. Sheng and Zhou (2011)는 일정한 체적변화 대신 일정한 응력하에서 산정된 흡수함수특성곡선(SWCC)을 이용하여 포화도와 간극비사이의 증분관계를 제시하였다. 그리고 Zhou et al. (2012)은 포화도와 초기 간극비사이의 증분관계를 토대로 불포화토의 흡수함수특성곡선(SWCC)에 대한 흡의 초기 밀도에 대한 영향을 정량적으로 분석하였다. 이상에서 보는 바와 같이 불포화 조건에서 흡의 초기 밀도 혹은 간극비는 흡수함수특성곡선을 변화시키게 되며, 이로 인하여 불포화 조건에서 투수특성도 변화하게 된다. 그러나 국내의 흡을 대상으로 상대밀도에 따른 흡수함수특성곡선(SWCC) 산정 및 불포화 투수계수함수(Hydraulic Conductivity Function, HCF)의 변화에 대한 연구는 매우 미흡하다.

불포화토의 투수계수함수를 결정하는 방법으로는 실험적인 방법과 이론적인 방법으로 구분할 수 있다. 그러나 실험적인 방법은 시험장치가 고가이고, 시간과 노력이 많이 필요하며 정확한 값을 측정하는 것이 매우 어렵기 때문에 이론적인 방법이 주로 사용되고 있다.

먼저, 실험적인 방법으로는 정상류 상태에서 측정법과 비정상류 상태에서 측정법으로 구분할 수 있다(Masrouri et al., 2008). 정상상태 실험법으로는 일반적인 일정수두법(constventional constant head), 일정흐름법 혹은 플로우펌프 기법(constant flow), 원심모형 시험법(centrifuge)으로 구분할 수 있으며, 비정상상태 실험법으로는 유출유입(outflow-inflow), 즉석프로파일법(instantaneous profile), 가온법(thermal method)로 구분할 수 있다.

한편, 이론적인 방법은 계수추정방법과 역해석기법으로 구분할 수 있다. 계수추정법은 불포화 투수계수함수를 직접 측정하는 어려움을 극복하기 위하여 흡수함수특성곡선과 불포화 투수계수함수의 관계에 근거한 불포화토 지배방정식을 풀어서 구한 수치해석 결과와 불포화토의 모관흡수력을 비교하여 구하는 방법이다. 특히 계수 추정방법은 경험적인 공식 및 통계적인 공식으로 구분할 수 있다. 경험적인 공식은 흡수함수특성곡선(Soil-Water Characteristics Curve, SWCC)의 불포화 관련계수를 이용하여 불포화 투수계수함수를 산정하는 방법이다(Wind, 1955; Gardner, 1958; Rijtema, 1965). 그리고 통계적인 공식은 흡수함수특성곡선(SWCC)의 불포화 관련계수를 적용하여 상대 투수계수함수를 예측하는 것이다. Campbell (1974)과 Fredlund and Xing (1994)은 Childs and Collis-Georges (1950)의 투수모델을 도입하여 상대 투수계수함수를 제안하였고, Brooks and Corey (1964)는 Burdine (1953)의 투수모델을 적용하여 상대 투수계수함수를 제안하였으며, van Genuchten (1980)은 Burdine (1953) 및 Mualem (1976)의 투수모델을 적용하여 각각의 상대 투수계수함수를 제안하였다.

국내에서는 기존에 개발된 시험장치를 이용하여 불포화토의 투수계수를 측정한 실험적인 연구(Jeong and Song, 1993; Lim and Lyu, 2008)와 불포화토의 흡수함수특성곡선(SWCC)을 산정하여 이를 토대로 불포화 투수계수함수를 산정하는 계수추정방법(Hwang and Kim, 2004; Kim et al., 2005)을 적용한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 이러한 연구에서는 주로 불포화토의 투수계수함수(HCF)를 산정하는 방법에 대하여 소개하고 있으며, 흡의 상대밀도에 따른 불포화 투수계수함수(HCF)의 변화에 대한 내용을 언급하지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 대표적인 모래인 주문진 표준사를 대상으로 초기 상대밀도에 따른 흡수함수특성곡선(SWCC)을 실험적으로 산정하고 이를 토대로, 불포화 투수계수함수(Hydraulic Conductivity Function, HCF)의 변화를 고찰하고자 한다. 이를

위하여 먼저 자동 흡·함수특성곡선 측정장치를 이용하여 상대밀도 40%, 60% 및 75%의 주문진 표준사에 대한 건조 및 습윤과정의 흡·함수특성곡선(SWCC)을 산정한다. 그리고 van Geuchten (1980)의 제안식을 적용하여 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 불포화 투수계수함수를 산정한다. 이를 토대로 상대밀도와 건조 및 습윤과정에 따른 주문진 표준사의 불포화 투수계수함수의 특성을 고찰하고자 한다.

2. 재료 및 시험장치

2.1 시험재료

본 연구에서는 주문진 표준사를 이용하여 시험을 수행하였다. ASTM D 4253-83 및 ASTM D 4254-83 시험법에 의거하여 주문진 표준사의 최대 및 최소 건조단위중량을 측정하고 상대밀도 40%, 60% 및 75%의 조건으로 시료를 성형하였다. 이와 같이 성형된

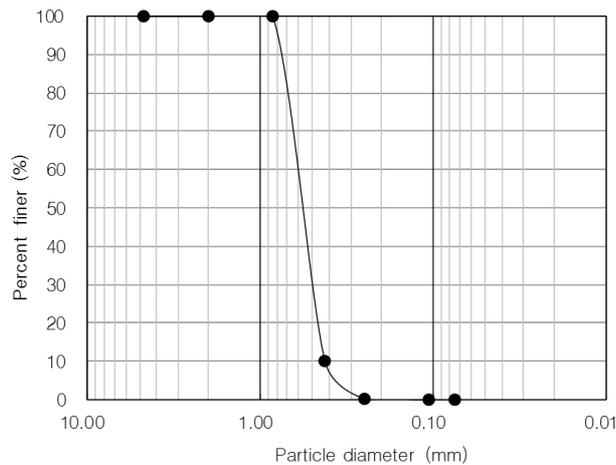


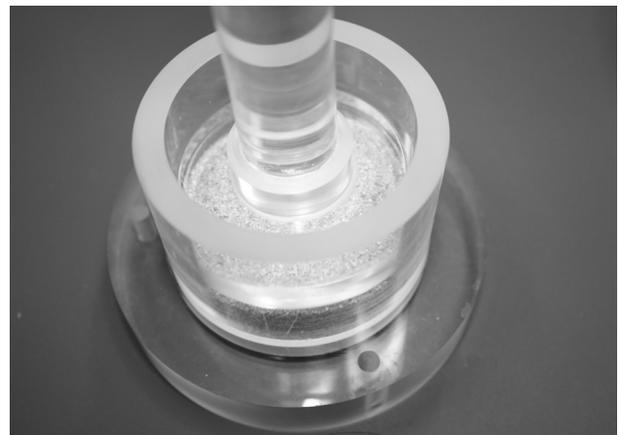
Fig. 1. Grain Size Distribution Curves of Jumoongjin Sand

Table 1. Physical Soil Properties of Jumoongjin Sand

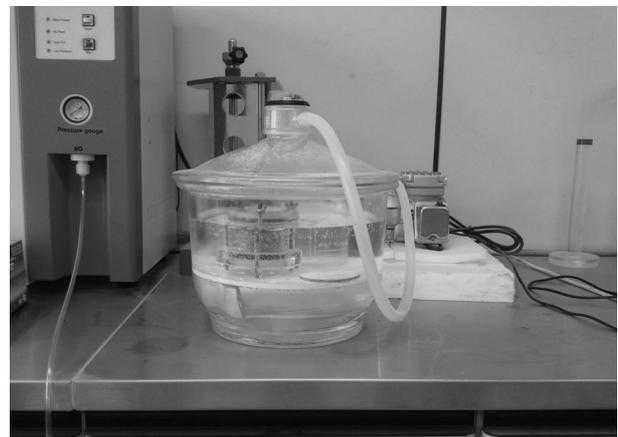
Description	Symbol	Property
Specific gravity	G_s	2.621
Max. void ratio	e_{max}	0.919
Min. void ratio	e_{min}	0.625
Max. dry density	γ_{dmax}	15.824kN/m ³
Min. dry density	γ_{dmin}	13.387kN/m ³
Effective particle size	D_{10}	0.42mm
D_{30} particle size	D_{30}	0.51mm
D_{60} particle size	D_{60}	0.63mm
Uniformity coefficient	C_u	1.5
Coefficient of curvature	C_c	1.0

시료는 포화를 시킨 후 자동 흡·함수특성곡선 시험장치를 이용하여 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. Fig. 1은 주문진 표준사의 입도분포곡선을 나타낸 것이며, Table 1은 주문진 표준사의 기본적인 물리적 특성을 나타낸 것이다.

본 시험에서는 먼저 시료를 포화시킨 후 공기압을 가하여 간극수를 배출하는 건조과정을 실시하게 된다. 플라스틱 몰드(직경 5.05cm, 높이 3.89cm)와 플라스틱 봉을 이용하여 3층 다짐을 실시하였다. Fig. 2(a)는 플라스틱 몰드에 시료를 성형하는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라스틱 봉으로 시료를 다져 상대밀도 40%, 60% 및 75%의 시료를 성형하였다. 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 2/3정도 물에 잠기도록 한 다음 진공펌프를 이용하여 데시케이터 내부를 진공상태로 만든다. 이때 시료는 높은 배압을 받게 되며, 물이 시료의 하부로부터 포화되면서 상부로



(a) Forming Soil Sample



(b) Saturation of Soil Sample

Fig. 2. Forming Method and Saturation of the Soil Sample

흘러가기 때문에 간극내 남아 있는 공기를 제거하면서 포화가 진행된다. 모래의 경우 약 1시간 이상을 두면 시료가 포화된다. Fig. 2(b)는 데시케이터 내부에 성형된 시료를 위치한 모습이다.

2.2 시험장치

2.2.1 흡수특성곡선 측정

본 연구에서는 주문진 표준사의 흡수특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흡수특성곡선 시험장치를 활용하였다 (Song et al., 2012). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생될 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화도의 흡수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다. 그리고 축변환기법(Hilf, 1956)을 도입하여 압력을 0-300kPa범위까지 적용할 수 있다.

본 시험장치는 압력조절장치(pressure panel), 플로우셀(flow cell), 물저장소 및 공기방울트랩(water reservoir and air bubble trap), 저울(balance), 선반 및 저장상자(shelf and storage box), 시료준비장치(sample preparation accessories), 측정시스템 등으로 구성되어 있다. Figure 3은 각각에 대한 구성요소들을 연결하여 설치된 자동 흡수특성곡선 시험장치의 전체적인 모습을 나타낸 것이다.

본 시험장치에서는 시료에 공기압을 가하여 포화된 시료를 불포화상태로 만드는 건조과정(drying process)과 불포화 시료에 물을 주입하여 포화상태로 만드는 습윤과정(wetting process)을 재현할 수 있으며, 건조 및 습윤과정에 따른 시료내 함수변화특성을 파악할 수 있다.

먼저 압력조절장치에 의해 조절 및 계획된 공기압을 흡시료에 가해지게 된다. 공기압에 의해 포화된 시료내 간극수가 빠져나가게 되며, 이러한 간극수는 HAE (High Air Entry) 디스크와 공기방울

트랩을 거쳐 저울을 통하여 측정된다. HAE 디스크는 공기와 흡입자들이 이동하는 것은 제한하지만 물의 흐름을 제한하지 않는다. 이때 공기압은 흡시료의 모관흡수력으로 작용하게 되며, 흡시료가 가지는 일정한 공기압입치를 넘어서게 되면 흡시료 내부에 있는 간극수가 빠져나오기 시작한다. 본 실험에서는 주문진 표준사를 사용하므로 1 bar의 HAE 디스크를 이용하였다.

이때 공기압은 흡시료의 모관흡수력으로 작용하게 되며, 흡시료가 가지는 일정한 공기압입치를 넘어서게 되면 흡시료 내부에 있는 간극수가 빠져나오기 시작한다. 저울은 컴퓨터와 연결되어있으며 가해진 공기압과 측정된 간극수의 무게는 자동측정 프로그램을 통해 실시간으로 확인 및 저장이 가능하다. 본 프로그램에서는 실시간으로 간극수의 유출입 상태를 그림으로 보여줌으로써 다음 단계의 공기압을 가하는 시점을 정확하게 알 수 있다. 따라서 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 건조 및 습윤과정에서의 흡수특성곡선을 예측할 수 있으며, 불포화도의 특성치를 산정할 수 있다.

2.2.2 포화투수계수 측정

본 연구에서는 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 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.

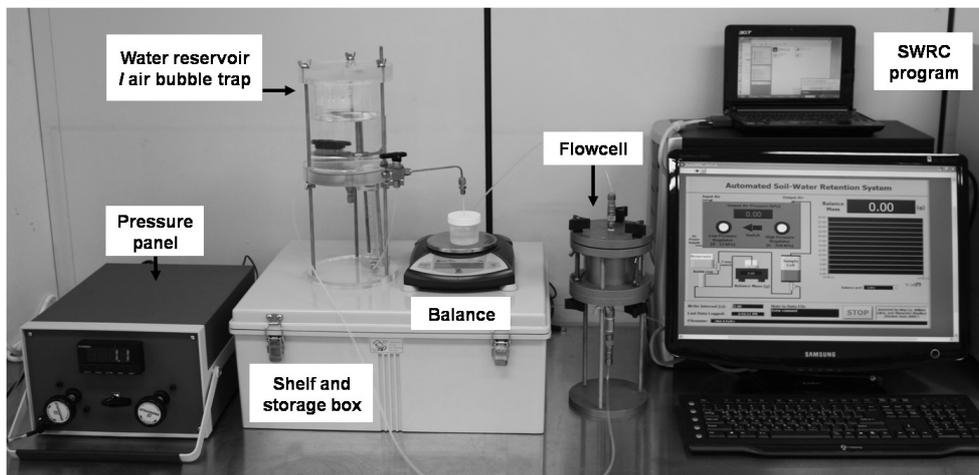


Fig. 3. Automated SWCC Apparatus (Song et al., 2012)

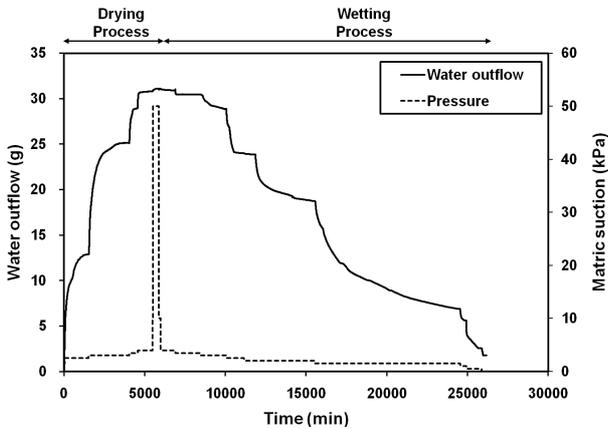


Fig. 4. Mass of Water Outflow for Various Matric Suctions ($D_r = 60\%$)

3. 시험결과 및 분석

3.1 모관흡수력과 간극수량 측정결과

Figure 4는 자동 흡·함수특성곡선 시험장치를 이용하여 상대밀도 60%인 주문진 표준사의 모관흡수력 재하 및 제하시 시간에 따른 간극수의 측정량을 나타낸 것이다. 즉, 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과, 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정에서는 모관흡수력이 증가함에 따라 간극수의 측정량은 증가하고, 습윤과정에서는 모관흡수력이 감소함에 따라 간극수의 측정량이 감소하는 것으로 나타났다. 단계별 모관흡수력의 조절로 인하여 간극수의 변화는 초기에 급격하게 변화하다가 시간이 지남에 따라 수렴하게 된다. 그리고 일정단계의 모관흡수력 수준에서 간극수 배출 및 유입이 수렴된 이후 다음 단계의 모관흡수력을 재하 혹은 제하하였다. 따라서 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 불포화상태에 대한 건조 및 습윤과정을 재현하였다.

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 공기압 조건에서 시료내 체적함수비는 건조과정에서 더 큰 것으로 나타났다.

3.2 흡·함수특성곡선(SWCC) 예측

측정된 모관흡수력과 간극수량을 토대로 van Genuchten (1980)의 제안식을 이용하여 흡·함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. van Genuchten (1980)은 Mualem (1976)의 모델을 토대로 유효포화도(S_e)와 압력수두(h)의 상관관계를 이용하여 흡·함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. Eq. (1)은 van Genuchten (1980)에 의해

제안된 흡·함수특성곡선(SWCC) 산정식을 나타낸 것이다.

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

여기서, S_e 는 유효포화도, S_r 는 잔류포화도, θ_s 는 포화체적함수비, θ_r 는 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) 제안식의 불포화 계수인 α , n 및 m 을 산정하였다. 최소제곱법의 신뢰도를 나타내는 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 건조과정의 경우 0.995-0.997, 습윤과정의 경우 0.984-0.993으로 매우 높게 나타났다.

Table 2는 건조 및 습윤과정에 대한 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 불포화 계수를 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 더 큰 값을 갖는다. 한편, 건조과정의 경우 상대밀도가 증가함에 따라 공기유입값과 관계된 계수 α 와 변곡점의 경사에 관계된 계수 n 은 감소하며, 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 증가하는 경향을 보인다. 그러나 습윤과정의 경우 상대밀도가 증가함에 따라 공기유입값과 관계된 계수 α 는 증가하나, 변곡점의 경사에 관계된 계수 n 과 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 변화가 매우 적은 것으로 나타났다.

Table 2에 제시된 불포화 계수를 이용하여 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 건조 및 습윤과정에서의 흡·함수특성곡선(SWCC)을 나타낼 수 있다. Fig. 7에서 Fig. 9는 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 흡·함수특성곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡·함수특성곡선은 일반적인 사질토에서 나타나는 S자 모양의 비선형적인 관계를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 건조과정의 모관흡수력이 습윤과정의 모관흡수력보다 상대적으로 큰 값을 나

Table 2. Fitting Parameters of Jumoonjin Sand for Various Relative Densities

Relative density		α (kPa^{-1})	n	m	R^2
$D_r = 40\%$	Drying	0.415	8.724	0.855	0.997
	Wetting	0.524	5.625	0.822	0.993
$D_r = 60\%$	Drying	0.399	8.586	0.884	0.995
	Wetting	0.548	5.625	0.822	0.991
$D_r = 75\%$	Drying	0.393	8.553	0.883	0.995
	Wetting	0.593	5.561	0.820	0.984

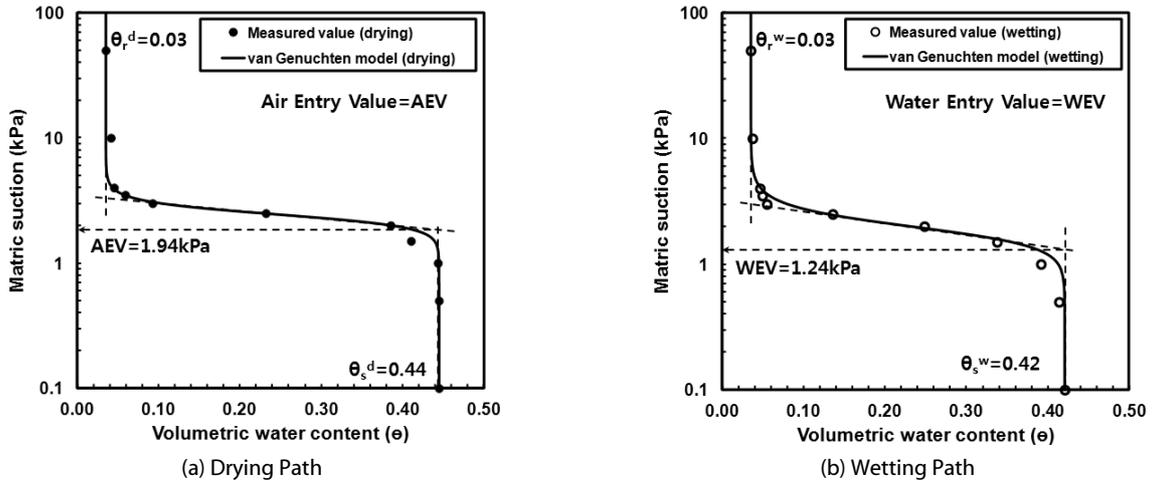


Fig. 5. Estimation of Volumetric Water Contents and AEV or WEV ($D_r=40\%$)

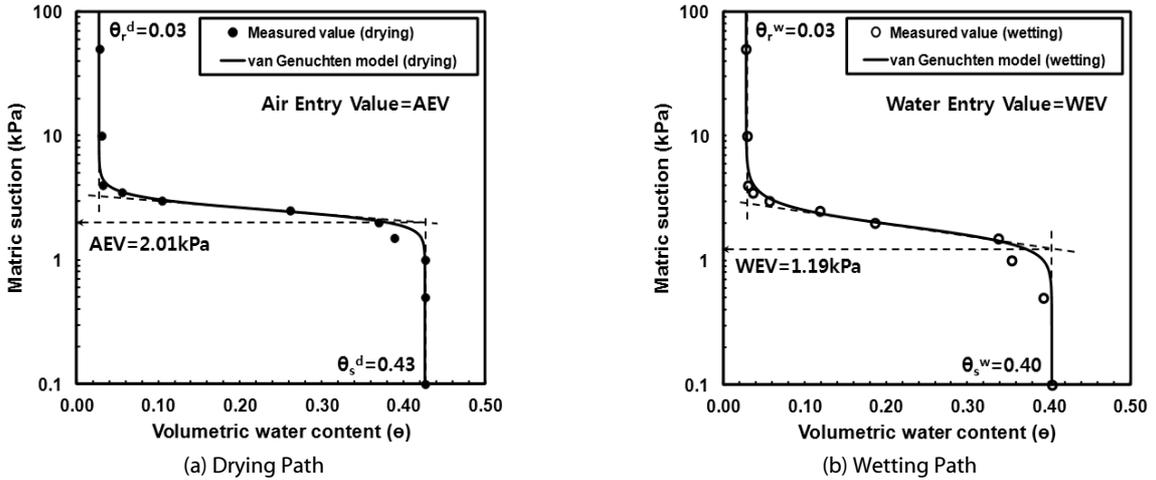


Fig. 6. Estimation of Volumetric Water Contents and AEV or WEV ($D_r=60\%$)

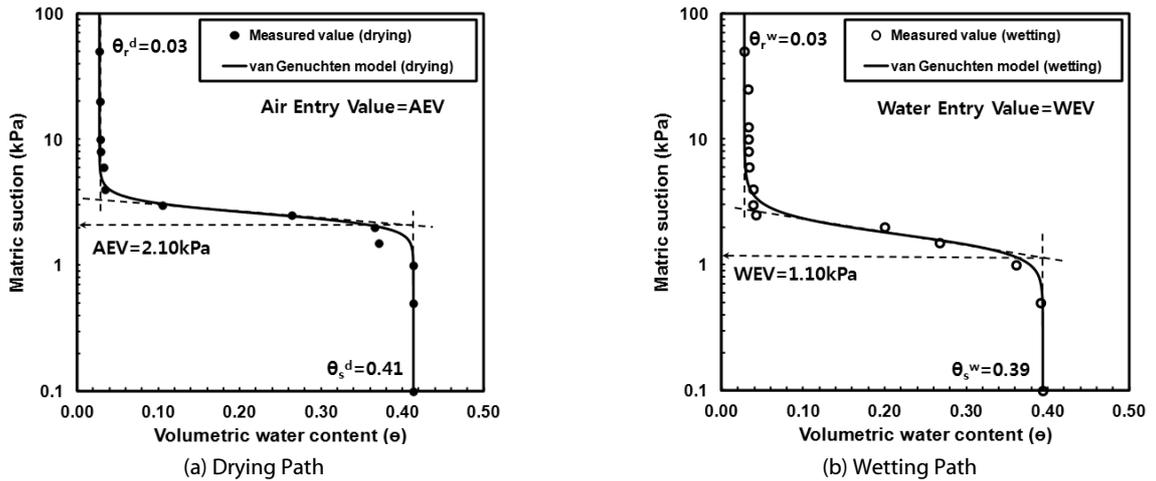


Fig. 7. Estimation of Volumetric Water Contents and AEV or WEV ($D_r=75\%$)

Table 3. Saturated and Residual Volumetric Water Contents, and AEV or WEV of Jumoonjin Sand for Various Relative Densities

Relative densities		θ_s	θ_r	AEV/WEV (kPa)
$D_r=40\%$	Drying	0.44	0.03	1.94
	Wetting	0.42	0.03	1.24
$D_r=60\%$	Drying	0.43	0.03	2.01
	Wetting	0.40	0.03	1.19
$D_r=75\%$	Drying	0.41	0.03	2.10
	Wetting	0.39	0.03	1.10

타내며, 곡선의 기울기도 차이가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5부터 Fig. 7에서 보는 바와 같이 건조 및 습윤과정의 흡·함수특성곡선(SWCC)을 토대로 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. 또한 상대밀도가 증가함에 따라 건조 및 포화체적함수비는 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 한편 동일한 상대밀도에서 공기함입치는 수분함입치보다 크게 나타나며, 상대밀도가 증가할수록 공기함입치는 증가하지만 수분함입치는 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 건조 및 습윤과정에 따른 측정결과와 van Genuchten (1980) 방법으로 예측한 흡·함수 특성곡선(SWCC)을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 모관흡수력에서 건조과정의 체적함수비가 습윤과정의 체적함수비 혹은 유효포화도 보다 더 크게 나타났다. 특히, 건조 및

습윤과정을 거치는 동안 흡입자 사이의 간극이 밀폐되어 간극 내 공기가 갇히게 되며, 갇힌 공기의 영향으로 인하여 건조과정의 포화체적함수비(θ_s^d)와 습윤과정의 포화체적함수비(θ_s^w)가 다르게 나타난다. 즉 건조 및 습윤과정의 흡·함수특성곡선이 일치하지 않는 이력현상이 발생됨을 확인할 수 있다.

건조 및 습윤과정에서 발생하는 흡·함수특성곡선의 이력현상에 대한 주요 원인으로는 잉크병 효과, 접촉각 영향 등을 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; Park et al., 2006; Shin and Park, 2006; Lee et al., 2008; Song and Choi, 2012; Oh et al., 2012).

3.3 불포화 투수계수함수(HCF) 예측방법 및 결과

불포화도의 투수계수함수를 결정하는 방법으로는 실험적인 방법과 이론적인 방법으로 나눌 수 있다. 우선 실험적으로 불포화도의 투수계수를 측정하는 방법으로는 수직기둥을 이용한 정상상태 해석(Richards, 1931), 반영구적인 멤브레인을 이용한 정상상태 해석(Hassler and Brunner, 1945), 그리고 비정상상태 해석(Welge, 1952)이 가장 많이 사용되고 있다. 반면, 이론적으로 불포화도의 투수계수를 결정하는 방법으로는 계수추정방법과 역해석기법이 가장 많이 사용되고 있으며 많은 연구자들에 의해 제안되어 왔다(Zachman et al., 1981; Dane and Hruska, 1983; Abu-Hejleh et al., 1993; Wildenschild et al., 1997).

보통 실험적인 방법으로 불포화도의 투수계수함수를 결정하기 어렵기 때문에 이론적인 방법을 선호하고 있다. 그 가운데 흡·함수 특성곡선의 불포화 계수를 이용하여 투수계수함수를 추정하는 계

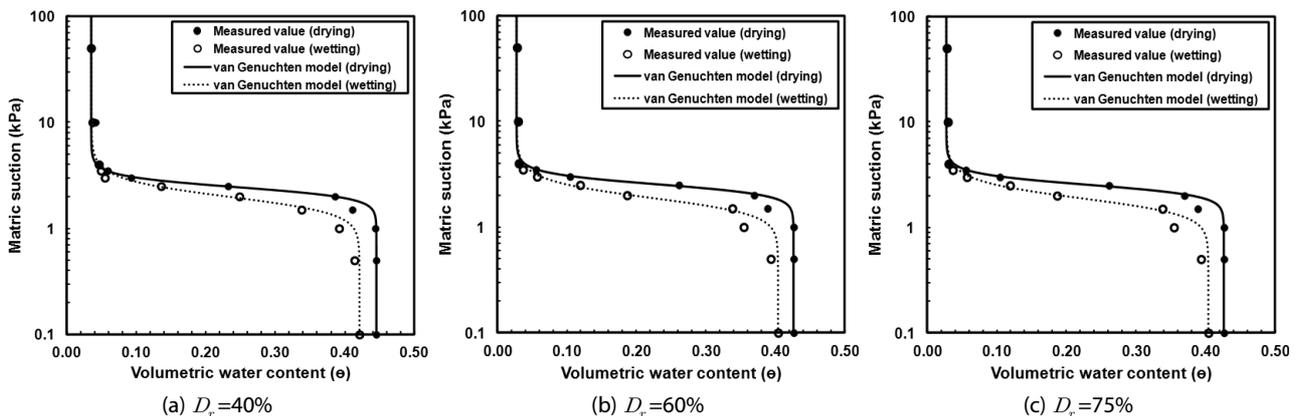


Fig. 8. SWCCs Estimated by the Van Genuchten Model

수추정방법이 주로 사용되고 있다. 특히 Mualem (1976)의 모델을 기초로 한 van Genuchten (1980)의 투수계수함수 모델이 계수추정방법으로 가장 많이 이용되고 있다. Eq. (2)는 van Genuchten (1980)이 제안한 불포화도의 투수계수함수를 나타낸 것이다.

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

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

Table 4는 상대밀도에 따른 주문진 표준사에 대한 건조 및 습윤과정에서의 포화투수계수를 나타낸 것이다. 이를 위하여 먼저 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 포화시 투수계수를 측정하였다. 이 값을 토대로 van Genuchten (1980)이 제시한 불포화도의 투수계수함수 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. 그리고 상대밀도가 증가함에 따라 건조 및 습윤과정에서의 포화투수계수는 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 모관흡수력과 불포화

Table 4. Saturated Hydraulic Conductivity of Jumooinjin Sand for Various Relative Densities

Relative density	Saturated hydraulic conductivity, k_s (cm/sec)	
	Drying	Wetting
$D_r = 40\%$	2.080×10^{-3}	1.583×10^{-3}
$D_r = 60\%$	1.998×10^{-3}	1.539×10^{-3}
$D_r = 75\%$	1.887×10^{-3}	1.482×10^{-3}

투수계수의 관계를 나타낸 것이다. 또한 건조과정의 공기함입치와 습윤과정의 수분함입치를 함께 도시하였다. 그림에서 보는 바와 모관흡수력이 증가함에 따라 불포화 투수계수는 일정하게 유지되다가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 즉 건조 및 습윤과정에서 불포화 투수계수는 포화시 투수계수로 일정하게 유지되다가 공기함입치 혹은 수분함입치 직전에 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 건조 및 습윤과정에서의 불포화 투수계수함수는 흙함수특성곡선에서의 동일하게 이력현상이 발생하는 것으로 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정의 투수계수함수가 습윤과정의 투수계수함수보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 특히 건조과정의 경우 습윤과정에 비해 비교적 큰 모관흡수력에서 투수계수의 감소가 시작되는 것으로 나타났다.

3.4 초기 상대밀도에 따른 불포화 투수특성 고찰

모래의 초기 상대밀도 혹은 초기 간극비는 흙함수특성곡선(SWCC)에 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 즉, 불포화 조건에서 흙의 초기 상대밀도 혹은 초기 간극비는 흙함수특성곡선을 변화시키게 되며, 이로 인하여 불포화 투수특성도 변화하게 된다 (Zhou et al., 2012). 이러한 영향을 고찰하기 위하여 Romero et al. (1999)는 흙내부의 간극을 두 가지로 크게 분류하였다. 즉, 모관현상에 지배되는 거시적인 관점에서의 간극과 물리화학적 힘에 의해 지배되는 미시적인 관점에서의 간극으로 분류하였다. Alonso et al. (2010)은 미시적인 관점에서 포화도는 외력(흡수력 혹은 기계적인 하중)에 무관하게 일정하며, 이는 잔류포화도와 동일하다고 하였다. 따라서 초기 상대밀도 혹은 초기 간극비의 변화는 오로지 거시적인 관점에서의 포화도 혹은 모관흡수력에 의해서만 영향을 미치며, 미시적인 그리고 잔류포화도는 초기 상대밀도 및 초기 간극비에 무관하다고 가정할 수 있다.

모래의 초기 상대밀도에 따른 불포화 투수특성 변화를 고찰하기

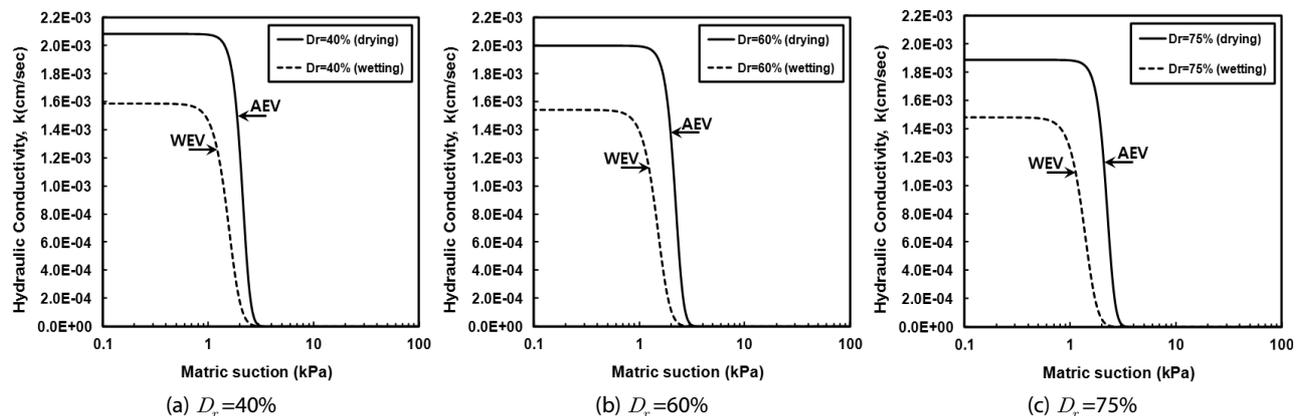


Fig. 9. Unsaturated Hydraulic Conductivity Function of Jumooinjin Sand for Various Relative Densities

위하여 모래의 초기 간극비와 공기함입치의 관계를 나타내었다. Fig. 10은 본 실험에서 사용된 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 초기 간극비와 건조과정에서의 공기함입치(AEV)를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 입도조성을 가진 모래에서 초기 간극비가 증가함에 따라 공기함입치는 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 모래의 공기함입치(AEV)와 초기간극비의 관계를 상관식으로 나타내면 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$AEV(kPa) = -1.57(e_i) + 3.19 \quad (3)$$

여기서, e_i 는 초기간극비이다.

한편, 모래의 초기 간극비와 포화투수계수의 상관관계를 고찰하기 위하여 건조 및 습윤과정에서의 포화투수계수와 모래의 초기간

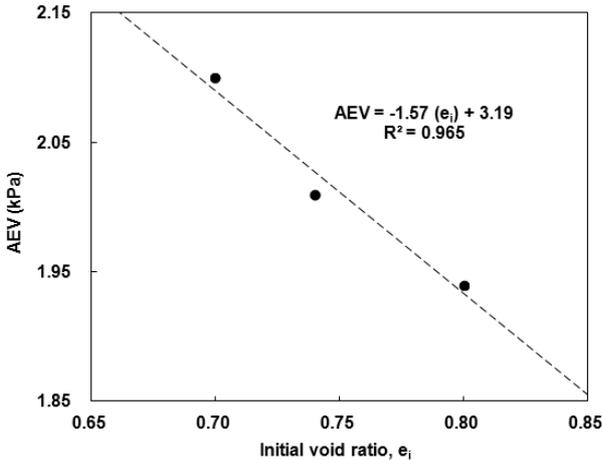


Fig. 10. AEVs on SWCCs of Jumooinjin Sand for Various Initial Void Ratios

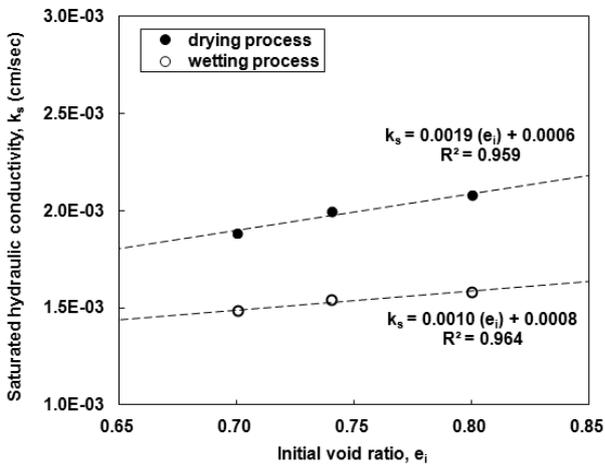


Fig. 11. Saturated Hydraulic Conductivities of Jumooinjin Sand for Various Initial Void Ratios

극비를 함께 도시하였다. Fig. 11은 모래의 초기간극비와 건조 및 습윤과정의 포화투수계수를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 건조 및 습윤과정에서의 포화투수계수는 초기간극비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그리고 모래의 초기간극비와 건조 및 습윤과정의 포화투수계수의 상관관계를 식으로 나타내면 Eq. (4)로 나타낼 수 있다. 이를 살펴보면 초기간극비에 따른 포화투수계수의 증가율은 건조과정이 습윤과정의 약 2배에 해당함을 알 수 있다. 이상에서 보는 바와 같이 모래의 초기 간극비에 따라 흠함수특성곡선(SWCC)과 불포화 투수계수함수(HCF)가 변화하게 됨을 확인할 수 있다.

$$k_s(cm/sec) = 0.0019(e_i) + 0.0006 \quad (\text{건조과정}) \quad (4a)$$

$$k_s(cm/sec) = 0.0010(e_i) + 0.0008 \quad (\text{습윤과정}) \quad (4b)$$

여기서, k_s 는 포화투수계수이다.

4. 결론

불포화 조건에서 흠의 초기 상대밀도 혹은 초기 간극비는 흠함수특성곡선을 변화시키게 되며, 이로 인하여 불포화 조건에서 투수특성도 변화하게 된다. 이에 대한 영향을 고찰하기 위하여 주문진 표준사의 초기 상대밀도에 따른 흠함수특성곡선(SWCC)과 불포화 투수계수함수(HCF)를 산정하였다. 먼저 자동 흠함수특성곡선 측정장치를 이용하여 상대밀도 40%, 60% 및 75%의 주문진 표준사에 대한 건조 및 습윤과정에서의 흠함수특성곡선(SWCC)을 산정하였다. 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 흠함수특성곡선(SWCC)으로부터 각각 불포화 계수를 결정하고, 이를 van Genuchten (1980)의 제안식에 적용하여 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 불포화 투수계수함수를 산정하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 흠함수특성곡선(SWCC)으로부터 불포화 계수를 산정한 결과 공기유입값과 관계된 계수 α 는 습윤과정에서 더 큰 값을 가지며, 변곡점의 경사에 관계된 계수 n 과 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 건조과정에서 더 큰 값을 갖는다.
- (2) 주문진 표준사의 상대밀도가 증가함에 따라 흠함수특성곡선(SWCC)상의 건조 및 포화체적함수비는 감소하는 경향을 보인다. 그리고 상대밀도가 증가할수록 공기함입치는 증가하지만 수분함입치는 감소하며, 동일한 상대밀도에서 공기함입치는 수분함입치보다 크게 발생된다.
- (3) 계수추정방법 가운데 하나인 van Genuchten (1980)의 불포화

투수계수함수를 산정한 결과 건조과정에서의 포화투수계수는 습윤과정에서의 포화투수계수보다 크게 나타나며, 상대밀도가 증가함에 따라 건조 및 습윤과정에서의 포화투수계수는 감소한다.

- (4) 건조 및 습윤과정에서 불포화 투수계수는 포화시 투수계수로 일정하게 유지되다가 공기함입치 혹은 수분함입치 직전에 급격하게 감소하며, 건조과정의 경우 습윤과정에 비해 비교적 큰 모관흡수력에서 투수계수의 감소가 시작된다.
- (5) 주문진 표준사의 초기 상대밀도 혹은 초기 간극비에 따라 흙함수특성곡선(SWCC)에서의 공기함입치(AEV)는 감소하고 포화투수계수는 증가하므로, 주문진 표준사의 초기 간극비에 따라 흙함수특성곡선(SWCC)과 불포화 투수계수함수(HCF)가 변화됨을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

Abu-Hejleh, A. N., Znicari, D. and Illangasekare, T. H. (1993). "Permeability determination for unsaturated soils." *Unsaturated Soils*, GSP No. 39, ASCE, Houston, S. and Wray, W. eds., pp. 163-174.

Alonso, E. E., Pereira, J. M., Vaunat, J. and Olivella, S. (2010). "A microstructurally based effective stress for unsaturated soils." *Geotechnique*, Vol. 60, No. 12, pp. 913-925.

Assouline, S. (2006). "Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve." *Vadose Zone Jour*, Vol. 5, No. 2, pp. 554-562.

Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964). *Hydraulic Properties of Porous media*, Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, CO. USA.

Burdine, N. T. (1953). "Relative permeability calculations from pore size distribution data." *Transactions, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, Vol. 198, pp. 71-78.

Campbell, G. S. (1974). "Simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data." *Soil Science*, Vol. 117, No. 6, pp. 311-314.

Childs, E. C. and Collis-George, N. (1950). "The permeability of porous materials." *Proc. Royal Society, London, Series A*, Vol. 210, pp. 392-405.

Croney, D. and Coleman, J. D. (1954). "Soil structure in relation to soil suction." *Jour. Soil Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 75-84.

Dane, J. H. and Hruska, S. (1983). "In-situ determination of soil hydraulic properties during leaching." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 47, No. 4, pp. 619-624.

Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 521-532.

Gallipoli, D., Wheeler, S. J. and Karstunen, M. (2003). "Modelling of variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil." *Geotechnique*, Vol. 53, No. 1, pp. 105-112.

Gardner, W. (1958). *Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils*, Highway Research Board Special Rep. No. 40, Int. Symp. on Physico-Chemical Phenomenon in Soils, Washington, D.C., pp. 78-87.

Hassler, G. L. and Brunner, E. (1945). *Measurement of capillary pressures in small core samples*, Petroleum Technology, Technical Paper, pp. 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.

Hwang, C. S. and Kim, T. H. (2004). "Determination of the unsaturated hydraulic conductivity function." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 20, No. 3, pp. 47-51 (in Korean).

Jeong, D. Y. and Song, K. S. (1993). "An experimental study of measuring unsaturated hydraulic parameters on joomoonjin sand." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 13, No. 5, pp. 261-273 (in Korean).

Kim, S. N., Park, C. W., Mok, Y. J. and Kim, S. M. (2005). "Determination of soil water characteristic curve and permeability equation of unsaturated soils using modified triaxial apparatus." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 21, No. 5, pp. 59-64 (in Korean).

Laliberte, G. E., Corey, A. and Brooks, R. (1966). "Properties of unsaturated porous media." *Hydrology Paper No.3*, Colorado State University, Fort Collins, CO. USA.

Lee, S. H., Seo, W. S., Choo, Y. W. and Kim, D. S. (2008). "Development of VPPE-BE testing system to evaluate modulus under post-compaction variation in matrix suction for unsaturated compacted soils." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 24, No. 5, pp. 117-127 (in Korean).

Lim, S. Y. and Lyu, T. J. (2008). "The analysis of permeability coefficient and the evaluation of equations of permeability coefficient for an unsaturated soils." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 24, No. 1, pp. 5-13 (in Korean).

Lu, N. and Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York. p. 556.

Masin, D. (2010). "Predicting the dependency of a degree of saturation on void ratio and suction using effective stress principle for unsaturated soils." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-90.

Masrouri, F., Bicalho, K. V. and Kawai, K. (2008). "Laboratory hydraulic testing in unsaturated soils." *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 26, pp. 691-704.

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.

- Oh, S. B., Lee, Y. H., Bae, I. S. and Kim, S. M. (2012). "The effect of soil water retention curves under confining stress on the effective stress in variably saturated soils." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 4C, pp. 169-175 (in Korean).
- Park, S. W., Shin, G. H. and Kim, B. S. (2006). "Soil-water characteristics and hysteretic behaviors on unsaturated pavement subgrades in test roads." *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 8, No. 2, pp. 95-104 (in Korean).
- Richards, L. A. (1931). "Capillary conduction of liquids through porous medium." *Jour. Physics*, Vol. 1, pp. 318-333.
- Rijtema, P. E. (1965). *An analysis of actual evapotranspiration*, Agricultural Research Rep. No.659, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Romero, E., Gens, A. and Lloret, A. (1999). "Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay." *Engineering Geology*, Vol. 54, No. 1-2, pp. 11-127.
- Sheng, D. and Zhou, A. N. (2011). "Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48, No. 5, pp. 826-840.
- Shin, G. H. and Park, S. W. (2006). "Effect of hysteresis on soil-water characteristic curve in weathered granite and gneiss soil slopes during rainfall infiltration." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 22, No. 7, pp. 55-64 (in Korean).
- Song, Y. S. and Choi, J. S. (2012). "Hysteresis of the suction stress in unsaturated weathered mudstone soils." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 3, pp. 55-66 (in Korean).
- Song, Y. S., Hwang, W. K., Jung, S. J. and Kim, T. H. (2012). "A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions." *Engineering Geology*, Vol. 124, pp. 90-97.
- Sun, D. A., Sheng, D., Xiang, L. and Sloan, S. W. (2008). "Elastoplastic prediction of hydro-mechanical behavior of unsaturated soils under undrained conditions." *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, No. 6, pp. 845-852.
- Tarantino, A. (2009). "A water retention model for deformable soils." *Geotechnique*, Vol. 59, No. 9, pp. 751-762.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898.
- Welge, H. J. (1952). "A simplified method for computing oil recovery by gas or water drive." *Transactions AIME*, Vol. 195, pp. 91-98.
- Wildenschild, D., Jensen, K. H., Hollenbeck, K. J., Illangasekare, T. H., Znicari, D., Sonnenborg, T. and 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*, Vol. 61, pp. 347-359.
- Wind, G. P. (1955). "Field experiment concerning capillary rise of moisture in heavy clay soil." *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Vol. 3, pp. 60-69.
- Zachman, D. W., Duchateau, P. C. and Klute, A. (1981). "The calibration of the Richards flow equation for a draining column by parameter identification." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 45, pp. 1012-1015.
- Zhou, A. N., Sheng, D. and Carter, J. P. (2012). "Modelling the effect of initial density on soil-water characteristic curves." *Geotechnique*, Vol. 62, No. 8, pp. 669-680.