

불포화토에서 흙의 구조가 흙-함수특성에 미치는 영향

Effect of Soil Structure on Soil-Water Characteristic in Unsaturated Soil

황 응 기¹ Hwang, Woong-Ki

강 기 민² Kang, Ki-Min

김 태 형³ Kim, Tae-Hyung

송 영 석⁴ Song, Young-Suk

Abstract

The purpose of this study is to determine the effect of soil grain size and its distribution on soil-water characteristic. To do this, soil-water characteristic tests were conducted on Saemangeum silt using the axis translation technique. For comparison, the test was also conducted on Jumunjin sand. Using the test results, the soil-water characteristic curves (SWCCs) of Saemangeum silt and Jumunjin sand were predicted by Van Genuchten model. By comparison and analysis between two SWCCs, the silt shows higher values of matric suction, water content, and air entry value than the sand. On the other hand, the sand has higher values of Van Genuchten model parameters of α , n , m than the silt. It indicates that the SWCC is significantly dependent on the structure of soils. In other words, if a soil has relatively high grain size and poor grain size distribution curve, the values of saturated volumetric water content, residual volumetric water content, and air entry value are small, and the variation of volumetric water content is high in accordance with the matric suction variation, and consequently it shows a narrow range of funicular region.

요 지

본 연구에서는 토립자의 입경과 입도분포가 불포화토의 흙-수분특성에 미치는 영향을 검토하고자 하였다. 이를 위해 축이동기법이 적용된 시험장치를 이용하여 현장에서 채취한 새만금실트에 대해 함수특성시험을 실시하였다. 비교를 위해 주문진 표준사에 대해서도 시험을 실시하였다. 시험으로부터 측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 van Genuchten 모델에 대한 흙-함수특성곡선을 추정하였다. 추정된 함수특성곡선의 비교분석결과 포화체적함수비, 잔류체적함수비 그리고 공기함입치 모두 모래보다 실트에서 더 높게 나타났으며, van Genuchten 모델의 계수 α , n , m 모두 실트보다 모래에서 더 크게 나타났다. 이는 불포화토의 흙-함수특성곡선은 흙의 구조적 특성(간극크기, 형태, 분포)과 밀접한 관계를 가지며 상대적으로 입경이 크고 입도분포가 불량한(다시 말해, 간극크기가 크고 간극분포가 균등한) 조립토일수록 포화체적함수비, 잔류체적함수비, 그리고 공기함입치가 작고, 모관흡수력 변화에 따른 체적함수비의 변화율이 크며, 따라서 전이 영역의 범위가 좁게 나타나는 경향이 있다는 것을 보여준다.

Keywords : Air entry value, Grain size, Pore size, Soil-water characteristic curve, Van Genuchten model

1 정회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Depart. of Civil and Environ. Engrg., Korea Maritime Univ.)

2 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Ph. D. Candidate, Depart. of Civil and Environ. Engrg., Korea Maritime Univ.)

3 정회원, 한국해양대학교 토목공학과 부교수 (Assoc. Prof., Depart. of Civil Engrg, Korea Maritime Univ.)

4 정회원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, yssong@kigam.re.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

불포화토 관련 연구를 살펴보면 불포화토에서는 부간극수압(또는 모관흡수력)의 영향으로 인한 겉보기 점착력의 발생과 간극 내의 공기 함입으로 인한 투수성 저하 등으로 인해 외부 하중조건에 따른 변형특성이나 지반내 간극수의 침투흐름이 포화토와는 다른 거동특성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Jennings and Burland, 1962; Fredlund and Morgenstern, 1977; Lu and Likos, 2006; Lu et al., 2007; 이승래 등, 2001; 김찬기, 2003; 성상규와 이인모, 2003; 유남동 등, 2004; 김태형, 2008). 기존의 전통적 포화토 관점에서 불포화토의 이러한 복잡한 거동특성을 이해하고 설명하는데 상당한 어려움이 존재한다. 따라서 최근 불포화토의 모관흡수력 변화에 따른 지반내 간극수 보유능 또는 침투능 사이의 관계를 나타내는 다양한 모델들이 제안되어져오고 있다(Gardner, 1958; Brooks and Corey, 1964; Campbell, 1974; van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994). 또한, 모관흡수력의 변화가 불포화토의 유효응력과 전단강도에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되고 있다. 하지만 흙 내부 토립자 간의 유효응력이나 전단응력을 직접적으로 측정하기에는 상당한 어려움이 있어 지금도 이에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 불포화토의 응력상태변수를 밝히기 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다(Bishop, 1959; Fredlund et al., 1978; Khallili and Khabbaz, 1998; Gray and Schrefler, 2001; Lu et al., 2010).

불포화토의 연구는 일반적으로 크게 세 가지의 측면에서 접근하고 있다. 첫 번째는 불포화토에 대한 이론적인 접근이며, 두 번째는 불포화토의 물성을 측정하는 실험적인 접근이며, 마지막 세 번째는 불포화토의 거동 예측에 초점을 둔 접근 방법이다. 이때 흙-함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)은 서로 다른 위 세 가지의 접근 방법들을 서로 연결시켜주는 중요한 역할을 한다. 즉, 흙-함수특성곡선은 불포화토의 역학적 특성을 규명하는데 있어 가장 기본적인 요소 중 하나이다. 흙-함수특성곡선은 모관흡수력과 포화도 혹은 체적함수비 사이의 관계를 나타내어주는 불포화토 고유의 물성으로서 불포화토의 흐름특성을 이해하고 함수량에 따른 흙의 강도 및 응력 거동특성을 해석하는데 필수적인 요소로 활용된다. 따라서 정확한 흙-함수특성곡선에 대한 측정 및 예측 없이 불포화토의 특성을 파악하는 것은 불가능하다고 할 수 있다(황창수와 김태형, 2003).

흙-함수특성곡선은 흙의 종류에 따라 다른 특성을 나타낸다. 즉, 흙-함수특성곡선은 모래, 실트, 점토에 따라 다른 형태를 보인다. 상대적으로 토립자의 입경이 크고 균등한 모래와 같은 조립토의 경우 동일한 모관흡수력 증가에 따른 체적함수비의 변화율이 점토나 실트에 비해 상대적으로 크고, 점토와 같은 세립토일수록 그 변화율은 작아진다. 또한, 흙의 입도가 양호하고 세립토일수록 공기함입치(Air Entry Value, AEV)와 포화체적함수비(saturated volumetric water content, θ_s) 그리고 잔류체적함수비(residual volumetric water content, θ_r)가 크게 나타난다. 즉, 각 모관흡수력에서 흙이 보유할 수 있는 함수량은 주로 그 흙의 구성성분, 토립자의 입경, 간극 크기(또는 간극경(pore size))와 간극크기분포(pore size distribution)에 따라 좌우되므로 흙-함수특성곡선은 입도에 따른 흙 구조의 영향을 크게 받는다고 알려져 있다.

본 연구에서는 입도분포가 다른 두 종류의 흙에 대한 모관흡수력과 체적함수비 사이의 거동 관계를 살펴보기 위하여 실내에서 실험용으로 많이 사용되는 주문진 표준사와 새만금지역에서 현장에서 채취한 실트에 대하여 각각 함수특성시험을 수행하였다. 시험은 최근에 한국지질자원연구원(송영석 등, 2010)에 구축된 축이동기법(axis translation technique)을 이용한 반자동화된 장치를 이용하였다. 함수특성시험으로부터 얻어진 모관흡수력과 체적함수비로부터 흙-함수특성곡선을 추정하고 비교분석함으로써 토립자의 입도분포와 흙-함수특성곡선 사이의 특징을 살펴보고자 한다.

2. 일반적인 흙-함수특성곡선

흙-함수특성곡선은 주로 토립자의 입경과 분포, 구성성분, 간극률 그리고 소성지수 등에 영향을 받으므로, 흙의 종류에 따라 각기 다른 형상과 특징을 나타낸다. 또한, 불포화토의 투수특성이나 응력-변형거동특성 또한 흙-함수특성곡선과 밀접한 상호관계가 존재한다. 따라서 흙-함수특성곡선은 불포화토의 특성을 이해하기 위해 가장 중요한 필수요소로 불포화토 연구에서 가장 핵심적인 기본물성이라고 말할 수 있다.

전형적인 흙-함수특성곡선의 모양은 그림 1과 같이 S자 형태를 보인다. 여기서 수평축은 주로 체적함수비($\theta = V_w/V$) 또는 유효포화도($S_e = (S - S_r)/(1 - S_r)$)로 나타내며 수직축은 보통 모관흡수력을 나타낸다. 포화

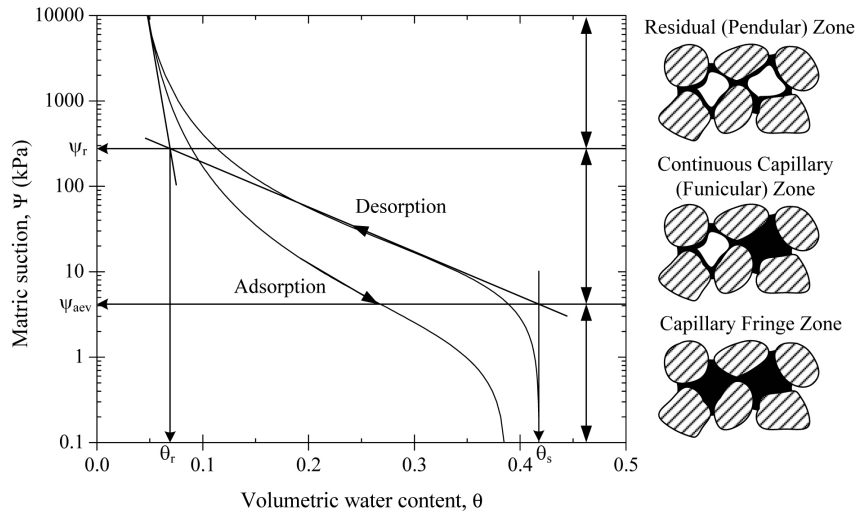


그림 1. 일반적인 흡-함수특성곡선

된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기함입치를 초과하지 않으면 간극으로부터 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기함입치는 간극 내부로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다. 그리고 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 유출되지 않는 함수비를 잔류함수비(θ_r)라 한다. 이 함수비에서 보유하고 있는 물은 오로지 열에 의해서만 제거될 수 있다. θ_s 는 포화체적함수비로서 흡의 간극 당 보유할 수 있는 최대체적함수비를 의미한다. 그림 1과 같이 흡-함수특성곡선은 모관흡수력 단계에 따라 세 개의 영역으로 구분할 수 있다. 흡이 포화상태로부터 공기침투압이 발생하는 시점까지가 capillary saturation(capillary) 영역이고, 공기침투가 발생된 시점부터 잔류포화도 발생 시점까지가 desaturation(funicular) 영역, 잔류포화도 발생 이후부터가 residual saturation(pendular) 영역이다.

전술한 것과 같이 흡-함수특성곡선은 토립자의 입경과 분포, 구성성분, 간극률 그리고 소성지수 등에 영향을 받으므로, 흡의 종류에 따라 각기 다른 형상과 특징을 나타낸다. 그림 2는 모래, 실트, 점토와 같이 흡의 종류에 따른 흡-함수특성곡선의 형태를 나타내고 있다. 여기서, 상대적으로 토립자의 입경이 크고 균등한 모래의 경우 동일한 모관흡수력 증가에 따른 체적함수비의 변화율이 실트나 점토에 비해 상대적으로 크게 나타나고, 실트나 점토와 같이 토립자의 입경이 작고 입도분포가 양호한 세립토일수록 그 변화율은 작게 나타난다. 포화체적함수비와 잔류체적함수비 그리고 공기함입치는 세립토가 조립토보다 큰 것을 알 수 있다. 포화체적함수비

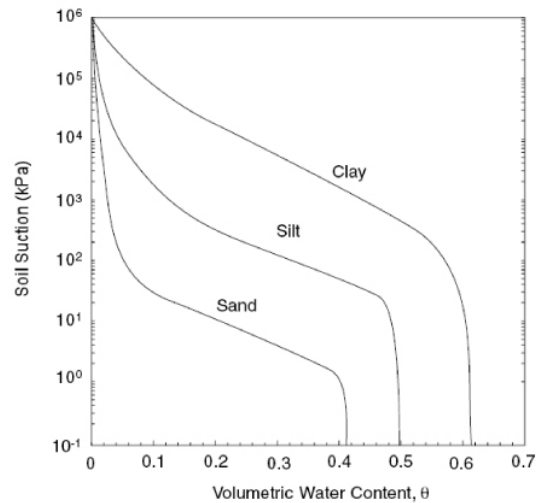


그림 2. 흡 종류에 따른 흡-함수특성곡선(Lu and Likos, 2004)

는 세립토의 경우 조립토에 비해 상대적으로 더 큰 간극률을 나타내기 때문이다. 또한, 토중수는 간극내 공기와 물의 접촉면에서 발생하는 모관력과 물분자를 흡착하는 흡입자의 표면력과 같은 물리 화학적 작용에 의하여 보유되고, 낮은 모관흡수력에서는 모관력이 우세하며 높은 모관흡수력에서는 표면력이 우세하다. 세립토의 잔류체적함수비가 조립토보다 큰 것은 높은 모관흡수력에서 세립토의 높은 표면력이 주요 원인으로 알려져 있다. 세립토의 공기함입치가 큰 것은 간극크기분포에 따른 것으로 세립토의 간극크기가 조립토의 간극크기에 비하여 상대적으로 작아 큰 모관력을 가지기 때문으로 판단된다. 따라서 각 모관흡수력에서 흡이 보유할 수 있는 토중수는 흡의 특성과 구조에 상당한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

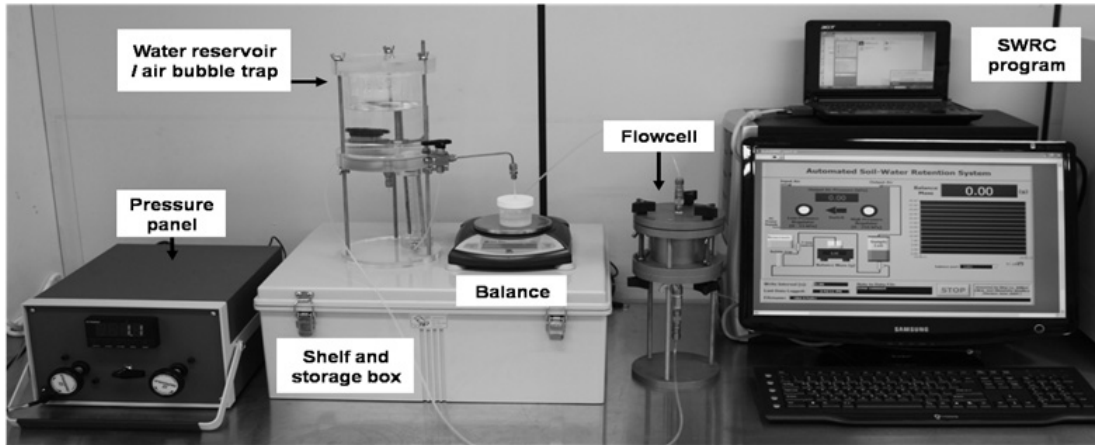


그림 3. 자동 흡-함수특성곡선 시험장치

3. 시험 장치 및 시료 특성

3.1 시험장치의 구성 및 특징

흡-함수특성곡선을 구하기 위한 방법으로는 흙의 기본적인 물리적 특성(입도분포곡선, 소성지수, 단위중량, 간극비 등)을 이용하여 흡-함수특성곡선을 유추하는 방법과 시험을 통해 흡-함수특성곡선을 추정하는 방법이 사용되고 있다. 흙의 기본적인 물리적 특성을 이용한 Pedo-Transfer Function(PTF)를 통해 흡-함수특성곡선을 유추하는 방법은(Cosby et al., 1984; Vereecken et al., 1989; Arya and Paris, 1981) 시간소모가 적고 비교적 해석이 간단하다는 장점이 있지만 시험을 통한 방법에 비해 정확도가 낮게 평가된다는 단점이 있다. 시험을 통해 불포화토의 모관흡수력을 측정하는 방법에는 텐시오미터(tensiometer), 축이동기법(axis translation technique), 접촉 필터 페이퍼기법(contact filter paper technique) 등이 사용되고 있다(Lu and Likos, 2004).

최근 송영석 등(2010)은 축이동기법(axis translation technique)을 이용한 반자동화된 흡-함수특성곡선 측정장치를 구축하였는데 기존의 방법에 비해 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며 시험자에 의해 발생될 수 있는 오차를 최소화하도록 고안되어 보다 정확한 불포화토의 흡-함수특성곡선을 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 함수특성시험을 위해 한국지질자원연구원에 구축된 자동 흡-함수특성곡선 측정장치를 활용하였다.

시험 장치는 크게 압력조절장치(pressure panel), 물저장소(water reservoir), 플로우셀(flow cell), 공기방울트랩(air bubble trap), 저울(balance), 시료준비장치(sample preparation accessories), 자동화 측정프로그램(SWRC program) 등으로 구성되어 있다(그림 3). 그림 4는 본 측정장치의 계통도를 나타낸 것으로서 측정장치의 측정원리를 개략적으로 나타낸다. 현장에서 채취된 시료를 상대밀도 75%의 단위중량으로 성형하고 물이 담긴 데시케이터에 수침시킨 후 데시케이터 내부에 부압을 가한 상태로 24시간 정도 방치하여 시료를 완전히 포화시킨다. 포화된 시료를 셋팅하고 압력조절장치에 의해 계획된 공기압을 흡 시료에 가한다. 공기압에 의해 포화된 시료내 간극수가 빠져나가게 되며, 이러한 간극수는 고공기함입(High Air Entry) 디스크(HAE disk)와 공기방울트랩을 거쳐 저울을 통하여 측정된다. HAE 디스크는 공기와 흡 입자들의 이동은 제한하지만 물의 흐름을 제한하지 않는다. 이때 물이 배출되는 배출구의 높이를 시료의 높이와 동일하게 유지시켜 간극수압이 0가 되도록 함으로써 가해진 공기압은 흡 시료의 모관흡수력으로

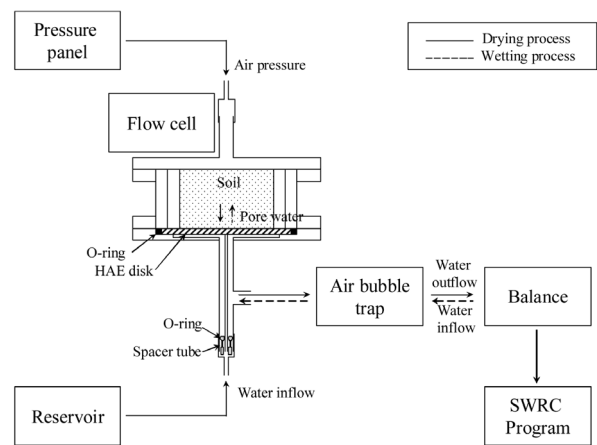


그림 4. 자동 흡-함수특성곡선 시험장치의 계통도

작용하게 된다. 흙 시료가 가지는 일정한 공기함입치를 넘어서게 되면 흙 시료 내부에 있는 간극수가 빠져나오기 시작한다. 이러한 과정을 통해 건조과정의 흙-함수특성곡선을 측정할 수 있다. 본 시험에 사용된 장치는 공기압을 0~300kPa범위까지 적용할 수 있다.

3.2 시험시료

본 연구에서는 주문진 표준사의 현장토인 새만금 실트가 시료로 사용되었다. 우선 시험재료의 비교를 위해 ASTM D 4254-83 및 ASTM D 4254-83 시험법에 의거하여 각 시료의 최대 및 최소건조단위중량을 측정하고 동일한 상대밀도 조건($D_r=75\%$)으로 흙-함수특성시험을 실시하였다. 그림 5는 주문진 표준사와 새만금 실트에 대한 입도분포곡선을 나타내고, 표 1은 주문진 표준사와 새만금 실트에 대한 기본적인 물리적 특성을 나타낸다.

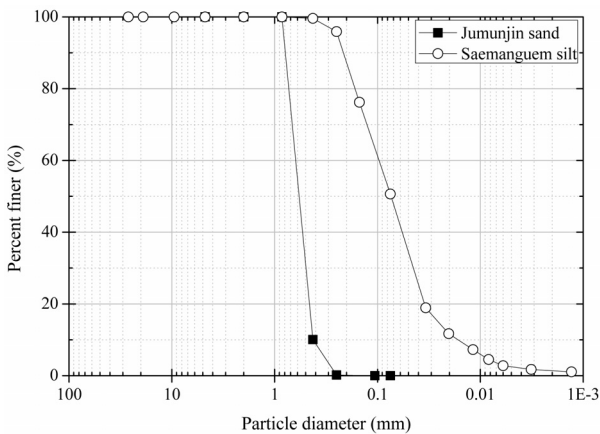


그림 5. 주문진 표준사 및 새만금 실트에 대한 입도분포곡선

표 1. 주문진 표준사 및 새만금 실트에 대한 물리적 특성

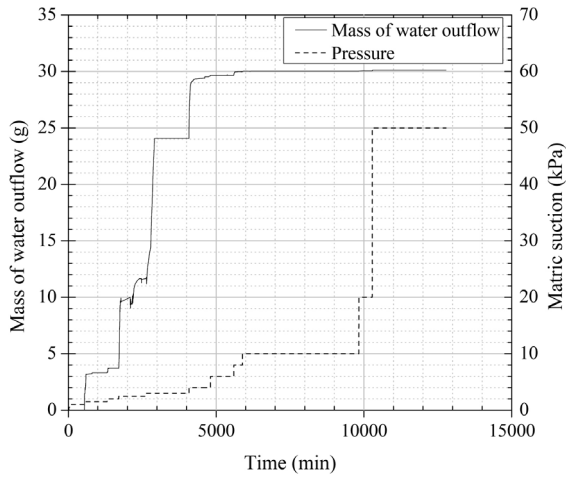
Description	Symbol		Jumunjin sand	Saemangeum silt
Specific gravity	G_s		2.621	2.685
Max. void ratio	e_{max}		0.919	1.452
Min. void ratio	e_{min}		0.625	0.692
$D_r=75\%$. void ratio	$e_{75\%}$		0.699	0.882
Max. dry density	γ_{dmax}	(g/cm ³)	1.613	1.587
Min. dry density	γ_{dmin}		1.366	1.095
D_{10} particle size	D_{10}	(mm)	0.421	0.017
D_{30} particle size	D_{30}		0.512	0.048
D_{60} particle size	D_{60}		0.631	0.102
Uniformity coefficient	C_u		1.499	6.022
Coefficient of curvature	C_c		0.987	1.340

주문진 표준사의 입경은 새만금 실트의 입경에 비해 상대적으로 크고 균등하다는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 75%의 동일한 상대밀도 조건에서 주문진 표준사는 새만금 실트에 비해 간극의 크기가 크고 일정한 분포를 가지기 때문에 동일한 모관흡수력 증가에 따른 체적함수비의 변화가 상대적으로 크며 공기함입치는 작을 것으로 예상된다. 또한 포화체적함수비는 간극비와 밀접한 관계를 가지기 때문에 상대적으로 큰 간극비를 가진 새만금 실트가 주문진 표준사에 비해 큰 포화체적함수비를 나타낼 것으로 예상된다.

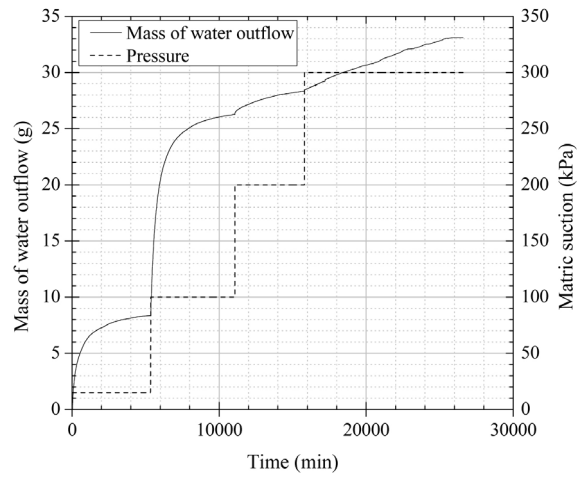
4. 시험결과 및 분석

4.1 함수특성 측정결과

그림 6은 모관흡수력 단계에 따라 배출되는 간극수의 무게를 시간에 따라 측정한 결과로서 주문진 표준사 및 새만금 실트의 시험결과를 나타낸다. 그림을 통해 알 수 있듯이 시험은 일정모관흡수력 단계에서 간극수의 유출량이 일정하게 수렴된 이후 다음 단계의 모관흡수력을 재하하는 방법으로 실시되었으며, 새만금 실트는 주문진 표준사에 비해 단계별 모관흡수력에 따른 초기 간극수의 변화가 완만하고 상대적으로 긴 시험시간을 갖는 특징을 가지고 있다. 이는 새만금 실트의 경우 간극 크기가 주문진 표준사에 비해 상대적으로 작아 투수계수가 작기 때문으로 판단된다. 또한 간극수가 배출되기 까지 더 큰 모관흡수력을 필요로 함을 알 수 있다. 이러한 원인은 실트의 경우 그 구성성분으로 인한 토립자의 표면력에 의한 것으로 판단된다.



(a) 주문진 표준사



(b) 새만금 실트

그림 6. 모관흡수력에 따라 배출된 간극수의 무게 변화량

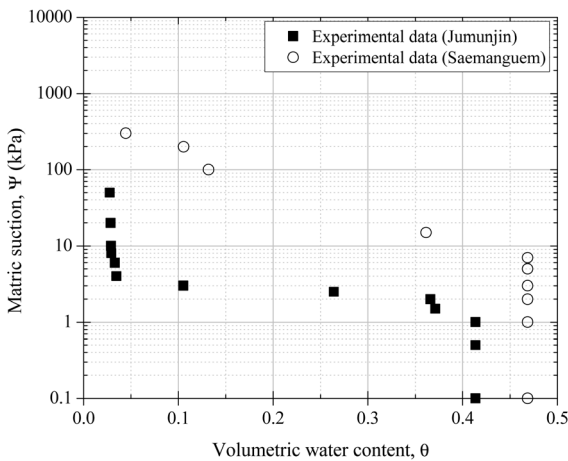


그림 7. 모관흡수력-체적함수비 관계

그림 7은 측정결과를 이용하여 모관흡수력과 체적함수비의 관계를 도식한 것으로서 모관흡수력 증가에 따라 체적함수비가 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 주문진 표준사의 경우 새만금 실트에 비해 간극수의 유출이 일어나는 공기함입치(Air Entry Value, AEV) 이상에서는 모관흡수력 증가에 따라 체적함수비가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 약 5kPa의 모관흡수력에서 대부분의 간극수가 유출돼 잔류포화상태(pendular state)에 도달한 것으로 나타났다.

흡-함수특성곡선을 예측하기 위해서는 측정결과에 대한 포화체적함수비(θ_s)와 잔류체적함수비(θ_r)를 산정하는 것이 중요하다. 여기서, θ_s 는 포화시 흡수량에 포함된 최대체적함수비를 의미하며 θ_r 은 모관흡수력 증가에도 불구하고 더 이상 물이 유출되지 않는 최소체적함수비를 의미한다. 포화 및 잔류체적함수비는 모관흡수

표 2. 흙 종류에 따른 포화체적함수비 및 잔류체적함수비

	θ_s	θ_r
주문진 표준사	0.413	0.028
새만금 실트	0.469	0.044

력과 체적함수비의 상관관계에서 모관흡수력에 따라 수렴되는 체적함수비로부터 구할 수 있다. 그 결과, 표 2와 같이 주문진 표준사의 θ_s 는 0.413, θ_r 은 0.028, 새만금 실트의 θ_s 는 0.469, θ_r 은 0.044로 각각 구할 수 있다. 새만금 실트의 경우 본 시험장비의 공기압 가력 한계인 300kPa까지 시험하였으나 정확한 잔류포화상태를 확인하지 못하였으나, 300kPa의 모관흡수력에 대응하는 체적함수비인 0.044를 잔류체적함수비로 산정하였다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 실트가 흙의 구성성분, 간극 크기, 간극크기분포 등의 이유로 일반적으로 모래보다 더 큰 잔류체적함수비를 나타내고, 주문진 표준사의 잔류체적함수비인 0.028보다 약간 크며, 그 이하의 잔류체적함수비의 변화가 흡-수분특성곡선의 전체적인 형상에 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단했기 때문이다. 포화체적함수비의 경우 실트의 간극률이 크기 때문에 이를 반영한 포화체적함수비 역시 실트가 크게 나온 것으로 판단된다.

4.2 흡-함수특성곡선의 추정

여러 연구자들에 의해 불포화토의 흡-함수특성곡선을 표현하기 위한 다양한 모델이 제안되어왔다(Gardner, 1958; Brooks and Corey, 1964; Campbell, 1974; van

Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994). 그 중에서도 지반공학 분야에서는 Brooks and Corey(1964), van Genuchten(1980), Fredlund and Xing(1994)이 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 함수특성시험으로부터 측정된 결과를 이용하여 흡-함수특성곡선을 추정하기 위하여 van Genuchten(1980) 모델을 이용하였다. 그 이유는 최소한의 계수를 이용하여 넓은 범위에 대한 연속적인 흡-함수특성곡선의 표현이 가능하기 때문이다. van Genuchten (1980)은 유효포화도(effective degree of saturation, S_e)와 모관흡수력(ψ)의 사이의 상관관계를 이용하여 흡-함수특성곡선에 대한 식을 다음과 같이 제안하였다.

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

여기서, S_e 는 유효포화도, α 는 공기유입값과 관계된 계수, n 는 변곡점의 경사에 관계된 계수, m 은 잔류함수비에 관계된 계수를 나타낸다.

식 (1)의 맞춤계수 α , n 그리고 m 은 식 (2)를 이용하거나 최소제곱회귀분석 통해 구할 수 있다. 우선 θ_s 와 θ_r 사이에 중간점 P를 구하고 이때의 모관흡수력($u_a - u_w$)_p 및 기울기 S_p 를 구한다. 그리고 α , n 그리고 m 은 식 (2a), (2b) 그리고 (2c)를 통하여 각각 구할 수 있다(van Genuchten, 1980). 본 연구에서는 맞춤계수를 최소제곱

회귀분석을 통하여 추정하였다.

$$\alpha = \frac{1}{(u_a - u_w)_p} (2^{1/m} - 1)^{1-m} \quad (2a)$$

$$n = 1/(1-m) \quad (2b)$$

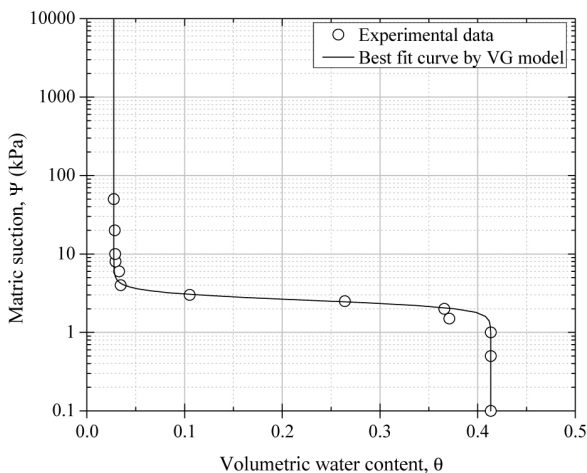
$$m = 1 - \exp(-0.8S_p) \quad (0 < S_p \leq 1) \quad (2c)$$

$$= 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3} \quad (S_p > 1)$$

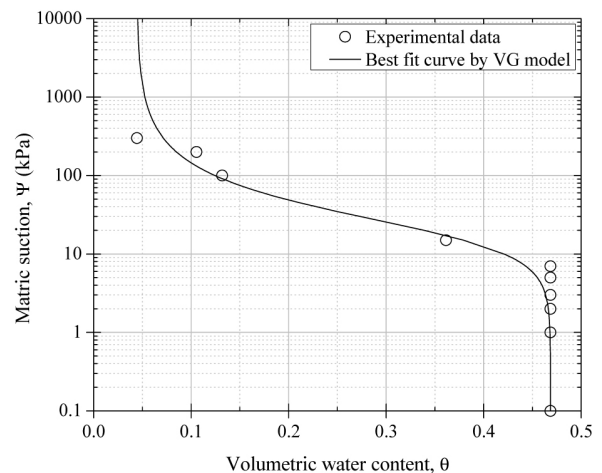
표 3은 각 시료에 대한 van Genuchten(1980) 모델의 맞춤계수를 추정하기 위하여 최소제곱회귀분석을 수행한 결과 결정계수(R^2)가 모래와 실트 각각에 대하여 0.995, 0.992로 나타나 추정된 흡-함수특성곡선이 시험 결과를 충분히 잘 추정하는 것으로 나타났다. 각 시료에 대한 맞춤계수는 주문진 표준사의 경우 α 는 0.393, n 은 8.855, m 은 0.887으로 나타났으며, 새만금 실트의 경우 α 는 0.052, n 은 2.003, m 은 0.501으로 구할 수 있다. 이는 모래와 실트에 대한 맞춤계수의 일반적인 범위와 일치한다. 그림 8은 van Genuchten 모델에 의해 추정된 주문진 표준사 및 새만금 실트의 흡-함수특성곡선을 나타낸 것으로 모래와 실트에 대한 전형적인 S자 형태의 비선형적 흡-함수특성곡선을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 모래의 공기함입치는 2.10kPa이며, 포화

표 3. 주문진 표준사 및 새만금 실트에 대한 물리적 특성

	α (kPa ⁻¹)	n	m	AEV(kPa)	R^2
주문진 표준사	0.393	8.855	0.887	2.10kPa	0.995
새만금 실트	0.052	2.003	0.501	8.51kPa	0.992

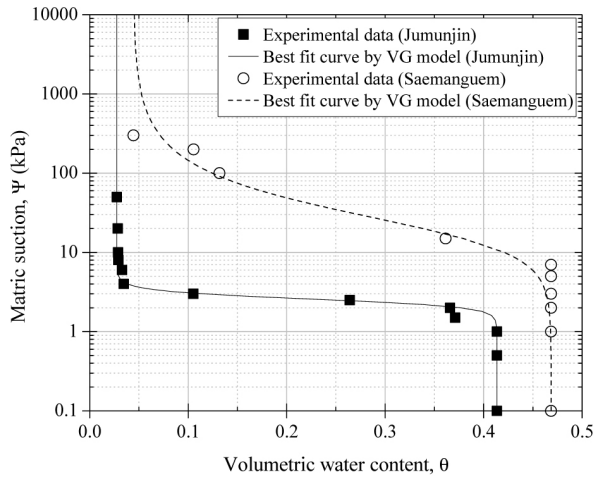


(a) 주문진 표준사

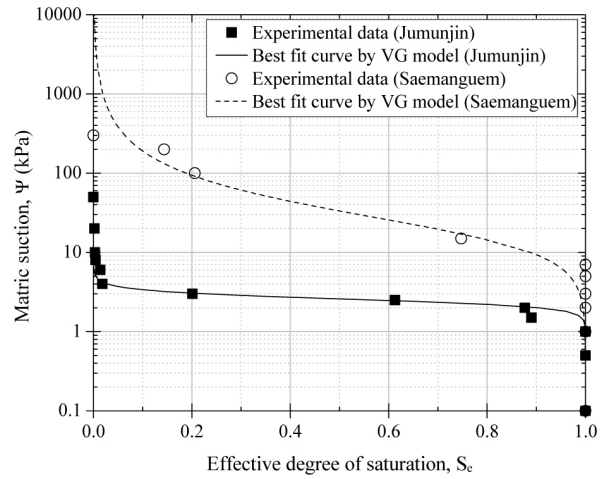


(b) 새만금 실트

그림 8. van Genuchten 모델에 의한 흡-함수특성곡선



(a) 모관흡수력-체적함수비 관계



(b) 모관흡수력-유효포화도 관계

그림 9. 흙-함수특성곡선 비교

체적함수비(θ_s)는 0.413, 잔류체적함수비(θ_r)는 0.028이다. 그리고 실트의 공기함입치는 8.51kPa이며, 포화체적함수비(θ_s)는 0.469, 잔류체적함수비(θ_r)는 0.044이다. 결과를 비교해 보면 공기함입치는 실트가 모래보다 약 4배정도 큰 것으로 나타났다.

4.3 흙-함수특성곡선 비교

그림 9는 van Genuchten(1980) 모델에 의해 추정된 주문진 표준사와 새만금 실트의 흙-함수특성곡선을 함께 도시한 것이다. 그림 9(a)는 모관흡수력과 체적함수비와의 관계를 나타내었고, 그림 9(b)는 그림 9(a)에서의 포화체적함수비와 잔류체적함수비의 차이를 제거하기 위하여 정규화한 것으로 모관흡수력과 유효포화도의 관계를 나타내었다.

그림 9(a)에서 실트가 모래에 비해 포화체적함수비, 잔류체적함수비 그리고 공기함입치에서 모두 큰 값을 나타내었다. 포화체적함수비가 모래에서 보다 실트에서 더 크게 나타난 것은 실트가 모래보다 더 큰 간극률을 가지고 있기 때문이다. 실트에서의 잔류체적함수비가 모래보다 큰 것은 높은 모관흡수력에서 지배적으로 작용하는 표면력이 실트가 모래보다 크기 때문에 판단되며, 공기함입치가 실트에서 더 큰 이유는 간극크기가 모래에서의 간극크기보다 작아 초기 낮은 모관흡수력에서 실트가 모래보다 더 큰 모관력을 나타내기 때문으로 판단된다.

그림 9(b)에서 동일한 모관흡수력에서 흙이 보유하는

유효포화도는 새만금 실트가 주문진 표준사보다 큰 것으로 나타났다. 그리고 새만금 실트의 경우 동일한 모관흡수력 증가에 따른 체적함수비의 변화율이 모래에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 실트의 간극크기가 모래의 간극크기보다 작고 입도분포 또한 실트가 모래보다 양호함으로써 실트의 모관력이 모래보다 더 크기 때문으로 판단되고, 모래의 경우 균등한 입도분포로 인해 좁은 모관흡수력 범위에서 유효포화도가 급격히 감소하는 것으로 판단된다. 즉, 흙-함수특성곡선은 흙의 구조적 특성(간극의 크기, 형태, 분포)과 밀접한 관계를 가진다고 사료되며 상대적으로 입경 및 간극의 크기가 크고 간극의 형태 및 분포가 일정한 주문진 표준사가 새만금 실트에 비해 민감한 불포화 함수거동을 나타낸다고 판단 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 입도분포가 다른 흙에 대하여 모관흡수력과 체적함수비 사이의 거동 관계를 살펴보기 위하여 주문진 표준사와 새만금지역에서 현장에서 채취한 실트에 대하여 각각 함수특성시험을 축이동기법이 적용된 시험장치를 이용하여 수행하였다. 함수특성시험으로부터 얻어진 시험결과로부터 van Genuchten(1980) 모델을 이용해 흙-함수특성곡선을 추정하고 이를 비교분석함으로써 토립자의 입도분포와 흙-함수특성곡선 사이의 특징을 살펴보고자 하였다. 본 연구로부터 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 동일한 상대밀도($D_r=75\%$)의 주문진 표준사와 새만금 실트를 대상으로 함수특성시험을 수행하였다. 그 결과 새만금 실트는 주문진 표준사에 비해 단계별 모관흡수력에 따른 간극수 유출량 변화가 완만하고 평형상태에 이르기까지 상대적으로 많은 시간이 소요됨을 알 수 있었다. 그 이유는 새만금 실트가 모래보다 상대적으로 작은 간극크기를 지니고 있어 상대적으로 작은 투수계수를 가지고 있기 때문으로 판단된다.
- (2) 함수특성시험 결과를 토대로 최소제공회귀분석을 통하여 van Genuchten(1980) 모델에 의한 흡-함수특성곡선을 추정한 결과 포화체적함수비, 잔류체적함수비 그리고 공기함입치에서 모두 큰 값을 나타내었다. 포화체적함수비가 모래에서 보다 새만금 실트에서 더 크게 나타난 것은 실트가 모래보다 더 큰 간극률을 가지고 있기 때문이고, 실트에서의 잔류체적함수비가 모래보다 큰 것은 높은 모관흡수력에서 지배적으로 작용하는 표면력이 실트가 모래보다 크기 때문에 판단되며, 공기함입치가 실트에서 더 큰 이유는 간극크기가 모래에서의 간극크기보다 작아 초기 낮은 모관흡수력에서 실트가 모래보다 더 큰 모관력을 나타내기 때문으로 판단된다.
- (3) 정규화된 흡-함수특성곡선에서 동일한 모관흡수력에 해당하는 두 시료의 유효포화도는 새만금 실트가 주문진 표준사보다 큰 것으로 나타났다. 그리고 전이(funicular)영역에서 새만금 실트의 경우 동일한 모관흡수력 증가에 따른 유효포화도의 변화율이 모래에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 실트의 간극크기가 모래의 간극크기보다 작고 입도분포 또한 실트가 모래보다 양호함으로써 실트의 모관력이 모래보다 더 크기 때문으로 판단되고, 모래의 경우 균등한 입도분포로 인해 좁은 모관흡수력 범위에서 유효포화도가 급격히 감소하는 것으로 판단된다.
- (4) 즉, 불포화토의 흡-함수특성곡선은 흙의 구조적 특성(간극크기, 형태, 분포)과 밀접한 관계를 가지며 상대적으로 입경이 크고 입도분포가 불량한(다시 말해, 간극크기가 크고 간극분포가 균등한) 조립토일수록 포화체적함수비, 잔류체적함수비, 그리고 공기함입치가 작고, 모관흡수력 변화에 따른 체적함수비의 변화율이 크며, 따라서 전이 영역의 범위가 좁게 나타나는 경향이 있는 것으로 판단할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인“광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김찬기 (2003), “불포화 풍화 화강토의 응력-변형률 거동 특성”, *대한토목학회 논문집*, 제23권 제3C호, pp.177-184.
2. 김태형 (2008), “습윤 모래에서 인장강도의 예측(I) : 이론”, *한국지반공학회 논문집*, 제24권 제6호, pp.27-35.
3. 성상규, 이인모 (2003), “화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제2호, pp.27-38.
4. 송영석, 이남우, 황웅기, 김태형 (2010), “자동 흡-함수특성곡선 시험장치 구축 및 활용”, *지질공학*, 제20권 제3호, pp.281-295.
5. 송영석, 이남우 (2010), “자동 흡-함수특성곡선 측정장치 구축”, *2010 춘계 지질과학기술 공동학술대회 논문집*, pp.62.
6. 유남동, 정상섭, 김재홍, 박성완 (2004), “강우시 점토함유량에 따른 화강풍화토의 불포화 침투 특성”, *한국지반공학회 논문집*, 제20권 제8호, pp.159-166.
7. 이승래, 이성진, 변위용, 장범수 (2001), “화강풍화토 지반의 불포화 특성을 고려한 최적화기법에 의한 사면안정해석 방법”, *한국지반공학회 논문집*, 제17권 제6호, pp.123-133.
8. 황창수, 김태형 (2003), “피스톤펌프장치를 이용한 흡-수분특성곡선 측정방법”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제5호, pp.155-162.
9. Arya, L. M., and Paris, J. F. (1981), “A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-size Distribution and Bulk Density Data”, *Soil Society of America Journal*, Vol.45, pp.1023-1030.
10. Bishop, A. W. (1959), “The principle of effective stress”, *Teknisk Ukeblad*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
11. Brooks, R. H., and Corey, A. T. (1964), “Hydraulic properties of porous media”, Colorado State University(Fort Collins), *Hydrology Paper*, 3, March.
12. Campbell, G. S. (1974), “A simple method for determine unsaturated conductivity from moisture retention data”, *Soil Science*, Vol.117, pp.311-314.
13. Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., and Ginn, T. R. (1984), “A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils”, *Water Resources Research*, Vol.20, No.6, pp.682-690.
14. Fredlund, D. G., and Xing, A. (1994), “Equations for the soil-water characteristic curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.3, pp.521-532.
15. Fredlund, D. G., and Morgenstern, N. R. (1977), “Stress Variables for Unsaturated Soils”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.103, No.5, pp.447-466.
16. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, D. A. (1978), “The shear strength of Unsaturated Soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.2, pp.261-276.
17. Gardner, W. R. (1958), “Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation

- from a water table”, *Soil Science*, Vol.85, No.4, pp.228-232.
18. Gray, W. G. and Schrefler, B. A. (2001), “Thermodynamic approach to effective stress in partially saturated porous media”, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol.20, No.4, pp.521-538.
 19. Jennings, J. E. B., and Burland, J. B. (1962), “Limitation to the use of effective stresses in unsaturated soils”, *Géotechnique*, Vol.12, pp.125-144.
 20. Khallili, N., and Khabbaz, M. H. (1998), “A unique relationship for the determination of the shear strength of unsaturated soils”, *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.681-687.
 21. Lu, N., Godt, J. W. and D. T. Wu (2010), “A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil”, *Water Resources Research*, Vol.46, W05515.
 22. Lu, N., and Likos, W. J. (2004), *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
 23. Lu, N., and Likos, W. J. (2006), “Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
 24. Lu, N., Wu, B., and Tan, C. P. (2007), “Tensile strength characteristics of unsaturated sands”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.2, pp.144-154.
 25. 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, No.5, pp.892-898.
 26. Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., and Darius, P. (1989), “Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content”, *Soil Science*, Vol.148, No.6, pp.389-403.

(접수일자 2011. 7. 7, 심사완료일 2011. 12. 22)