

실트함유율에 따른 낙동강 모래의 불포화 함수특성곡선

Unsaturated Soil-Water Characteristics Curve with Silt Contents for Nak-Dong River Sand

문 홍 득¹⁾ · 김 대 만[†]

Moon, Hongduk · Kim, Daeman

ABSTRACT : In this paper, we got soil-water characteristic curve(SWCC) of Nak-Dong River's sand respectively as relative density 40%, 60%, 80% and content of silt 0%, 10%, 20%, 30%. As a result, the more the sand density in the same silt content and the more the sand has silt in the same relative density, the change of volume water content was decreased. we have known effect of silt contents for SWCC and verified existing empirical formula of SWCC. As experiment results of soil-water characteristic curves compared to the empirical solutions, the results of van Genuchten(1980) and Fredlund & Xing(1994) were well-matched showing S type curves with experiment results. Especially the empirical solution of Fredlund & Xing showed almost same results of the coefficient of correlation(R^2) equal to 0.99.

Keywords : Soil-water characteristic curve, Nak-Dong River sand, Silt contents, Relative density

요 지 : 본 연구에서는 낙동강 모래를 상대밀도 40%, 60%, 80%, 실트 함유율 0%, 10%, 20%, 30%에 대한 함수특성곡선을 구하였다. 시험결과, 동일 실트함유율에 대해서는 상대밀도가 커질수록 그리고 동일 상대밀도에서는 실트함유율이 커질수록 체적함수비의 변화가 작게 나타났다. 기존의 경험식을 통해 구한 함수특성곡선과 시험에서 구한 결과를 비교하여 보면, van Genuchten(1980), Fredlund와 Xing(1994) 경험식에 의한 함수특성곡선은 시험결과와 경향과 비슷한 S자형 곡선을 나타내어 비교적 시험결과와 잘 부합하였다. 특히 Fredlund와 Xing 경험식의 경우 상관계수(R^2)가 모두 0.99로 나와 거의 일치하는 결과를 보였다.

주요어 : 함수특성곡선, 낙동강 모래, 실트함유율, 상대밀도

1. 서 론

최근 들어 지반공학 연구 분야에서 불포화토에 대한 관심이 급증하고 있다. 이는 지금까지 지반공학에서는 일반적으로 포화토에 대한 연구가 대부분이었으나 고전적인 포화토의 개념과 원리로는 실제 지반에서 발생하는 현상과 거동이 제대로 해석되지 않는 많은 공학적 문제들이 존재하기 때문이다.

현재까지의 연구동향을 살펴보면 불포화토는 부(-)간극수압의 영향으로 겔보기점착력을 보임과 동시에 전단마찰 각도 증가되고, 간극 속의 흐름에 있어서는 공기의 함입으로 투수성이 저하하는 등 완전포화토와는 다른 거동특성을 나타내는 것으로 알려지고 있으며, 이러한 불포화토 만의 거동특성은 포화토 거동특성에 비해 이해하기 어렵고 복잡하여 연구 결과 역시 미진한 상태이다. 이러한 어려움에도 불구하고 불포화토를 연구해야 하는 이유는 지반을 굴착하거나 다짐하는 등의 토공뿐만 아니라 댐이나 교량기초 등의

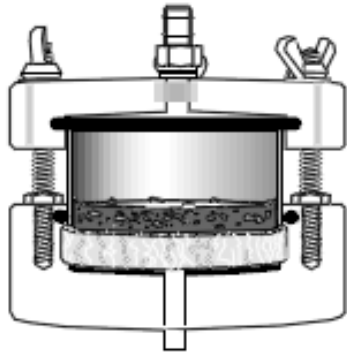
모든 토목공사는 대부분 불포화지반 위에서 행하여지기 때문이다.

특히 정부가 새롭게 추진하는 홍수방지와 물 부족 및 물 오염을 근본적으로 해결하기 위한 하천복원 프로젝트인 “4대강 살리기” 중 한 곳인 낙동강유역에는 모래 지반이 넓은 지역에 걸쳐 분포되어 있으며, 이러한 지역에 중소규모의 댐과 홍수조절지, 하천변 저류지 및 저수지 재개발의 많은 토목 구조물이 건설될 예정이다. 우리나라에서 댐이나 제방 등과 같은 토목공사가 시행되는 현장의 대부분 지반은 불포화토 영역이고, 이러한 국내 지반의 특성으로 비추어 볼 때 불포화토 연구는 계속적으로 연구되어야 할 중요한 분야라고 할 수 있다.

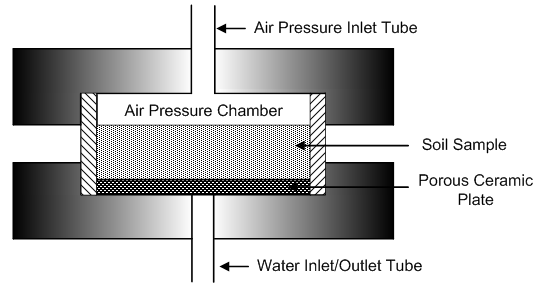
본 연구에서는 낙동강 모래와 실트를 대상으로 실트함유율과 상대밀도를 달리하여 성형한 혼합토를 대상으로 압력판 추출 시험기(volume pressure plate extractor test)와 데시케이트(desiccator)를 사용하여 불포화 지반을 조성한 후 불포화토의 기본물성인 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve,

1) 정희원, 경남과학기술대학교 건설환경공과대학 토목공학과 교수

† 정희원, 경남과학기술대학교 건설환경공과대학 토목공학과 겸임교수(E-mail : ksmans11@hanmail.net)



(a) 템페셀 단면도



(b) 템페셀 모식도

그림 1. 템페압력셀

SWCC)을 구하였다. 함수특성곡선은 불포화 지반의 여러 지반공학적 문제 해석을 위한 기본 자료로 본 연구에서는 다양한 실트함유율에 따른 실트질 모래지반의 불포화 함수특성을 분석하였다. 또한 기존 함수특성곡선 경험식의 인자를 산정하여 본 연구의 결과와 비교분석을 통해 함수특성곡선에 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 연구하였다.

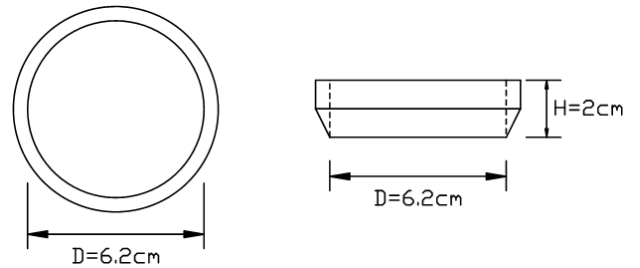


그림 2. 시험용 링

2. 시험 장치 및 시료 특성

2.1 시험장치 및 방법

2.1.1 압력판 추출 시험

압력판 추출 시험기는 일반적으로 시료에 다양한 흡인력을 적용하여 그 변화를 측정할 때 사용하는 것으로 이러한 시험을 압력판 추출 시험(pressure plate extractor test : ASTM D6836)이라고 한다. 이 시험장치는 흙의 함수특성곡선을 측정하기 위하여 사용되는데 압력실과 고압의 공기함입저항치를 갖는 세라믹판으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 템페 압력셀(Tempe pressure cell)을 사용하여 함수특성곡선을 측정하였으며 그림 1에 나타내었다.

시료를 성형하기 위해 그림 2와 같이 높이 2.0cm, 직경 6.2cm의 구속용 링을 사용하여 시료를 조성하였다. 조성된 시료는 디스크의 위에 놓고 계획된 흡인력을 압력셀에 가한다. 이 경우 가하여진 흡인력이 디스크의 공기함입 저항치를 초과하지 않는다면 공기는 통과하지 못한다. 디스크의 공기함입저항치는 디스크 내의 미세 공극의 지름과 관계되므로 공기함입저항치와 압력셀의 강도 조절에 따라 시료에 최대 공기압을 적용할 수 있다. 본 연구에 사용된 디스크의 최대 공기압은 506.5kpa으로 흡인력에 의하여 시료 내 간극수가 디스크 아랫부분으로 배출되며, 바닥부분과 연결된 뷰렛을 통하여 물의 체적변화를 측정하게 된다. 평형상태에

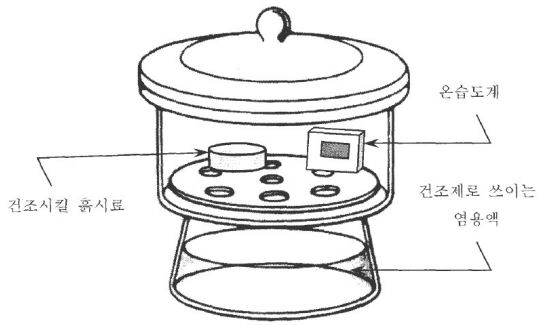
도달하게 되면 시료는 증가된 흡인력에 부합하여 함수비가 감소될 것이다. 각각의 평형상태의 함수비는 물의 체적변화를 측정함으로써 산정된다.

2.1.2 데시케이터 시험

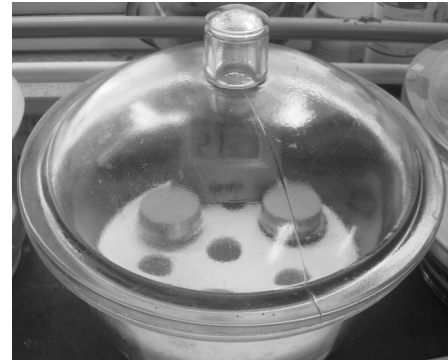
데시케이터(desiccator) 시험은 Young(1967)이 제안한 시험으로 포화된 염용액을 밀폐된 데시케이터 내에 넣어서 용기내의 상대습도와 수증기압이 어느 특정한 값을 가지도록 흡수력 값을 조절하는 시험이다.

그림 3과 같이 데시케이터는 물체가 건조 상태를 유지하도록 보존하는 용기로서 고체, 액체 등의 건조, 습기제거 또는 흡습성 물질의 조분 등에 주로 사용되는 시험기구로 용기의 본체와 뚜껑은 밀착되어 있으나, 그 사이에 얇게 그리스(grease)를 발라 외부 기체의 침입을 차단한다. 중간에 구멍이 뚫린 도자기제의 밀판을 놓고, 밀판 밑에 건조제를 위에는 시료를 위치시킨다. 또한 내부의 온도와 습도를 측정할 수 있도록 온습도계를 설치해 두며, 표 1에 건조제로 사용된 염용액들의 23℃에서 상대습도와 모관흡수력을 나타내었다. 그림 3에 데시케이터 시험장치를 나타내었다.

시험방법은 간단히 설명하면 먼저 데시케이터를 온도조절이 가능한 온도유지장치 속에 설치하고 데시케이터 내부 도자기제 아랫부분에 가장 높은 습도상태를 만들어주는 Sodium Chloride를 적당량 담는다. 압력판 추출 시험이 끝



(a) 데시케이터 시험기 모식도



(b) 데시케이터 시험기 사진

그림 3. 데시케이터 시험기

표 1. 염용액과 흡수력

염용액	온도(°C)	상대습도(%)	모관흡수력(MPa)
Lithium Chloride	23	11.3	297.6
Magnesium Chloride	23	32.9	151.7
Magnesium Nitrate	23	53.4	85.6
Sodium Chloride	23	75.7	38

난 템페셀 속에 있던 시료를 꺼내 무게를 측정 후 즉시 데시케이터 내 도자기제 위에 둔다. 그리고 데시케이터 뚜껑을 완전히 밀폐시킨 후 온도를 일정하게 유지시킨다. 같은 상대습도는 일주일씩 유지하도록 하고 상대습도 변화를 위해 용액을 교체할 때마다 변화된 함수량을 측정하기 위해 시료의 무게를 잰다. 마지막으로 시험이 끝난 시료는 건조기로 완전히 건조시킨 후 건조 상태의 질량을 측정한다.

2.2 시료특성

2.2.1 시료의 물리적 특성

본 연구에서는 낙동강 중류 지역의 모래를 채취한 후 깨끗한 모래에 대한 시험을 위하여 #20체~#200체 사이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 clean sand로 만들어 시험에 사용하였다. 실트의 경우도 낙동강 중류 지역에서 채취한 후 깨끗한 물에 씻어 #200체 통과시료에 대하여 자연 건조시켜 사용하였다. 시료 준비 후 실트 함유율의 변화에 따른 함수특성곡선을 연구하기 위하여 모래와 실트를 섞어 실트질 모래를 인위적으로 구성하였으며, 실트의 기본물성치와 실트함유율에 따른 실트질 모래에 대한 기본물성치는 표 2,

표 2. 실트의 물성치

Index properties	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plastic Index (%)	Pass #4 (%)	Pass #200 (%)	USCS
Silt	34	26	8	100	100	ML

표 3. 실트질 모래의 물성치

Index properties	Silt contents			
	0%	10%	20%	30%
Gs	2.637	2.640	2.638	2.638
D ₁₀ (mm)	0.19	0.08	0.02	0.01
D ₃₀ (mm)	0.22	0.22	0.20	0.12
D ₆₀ (mm)	0.25	0.24	0.24	0.23
C _u	1.316	3.038	10.435	23.200
C _z	1.038	2.445	7.246	6.207
USCS	SP	SP	SM	SM

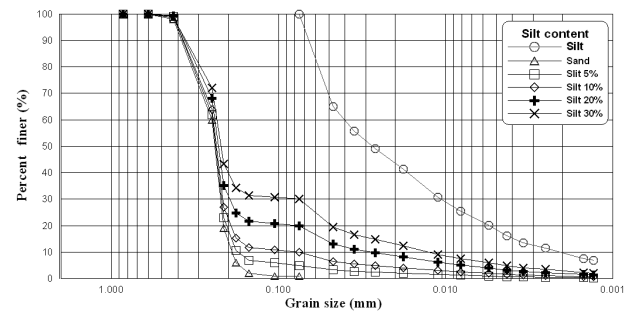


그림 4. 시료의 입도

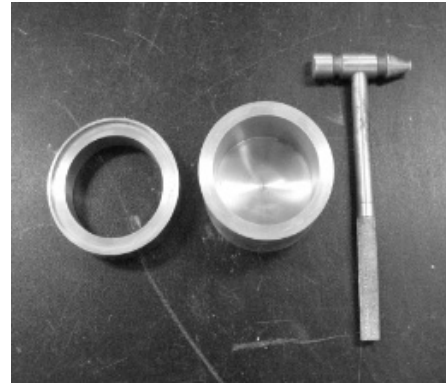
표 3과 같고, 각 시료에 대한 입도를 그림 4에 나타내었다.

2.2.2 시료의 상대밀도

상대밀도를 선정하기 위해서 본 논문에서는 ASTM (D4253, D4254)과 JIS A 1224(2000)에서 규정한 두 가지 방식을 사용하여 최대 및 최소간극비를 결정하였다. ASTM 방법 중 최소간극비 산정방법은 건조시료 진동을 가할 수 있는 몰드에 넣은 후 시료상부에 초기압력 14kpa를 가하면서 2a(진폭)=0.48mm, 주파수(f)=50Hz로 12분 동안 진동시킨 후 체적을 측정하여 최소간극비를 산정하였다. 최대간극비는 흡입자의 다짐을 최소로 하는 방식으로 체적을 알고 있는 용기에 시료를 넣어 흡의 단위중량을 결정하여 산정하였다.



(a) ASTM



(b) JIS

사진 1. 최소 및 최대간극비 시험기구

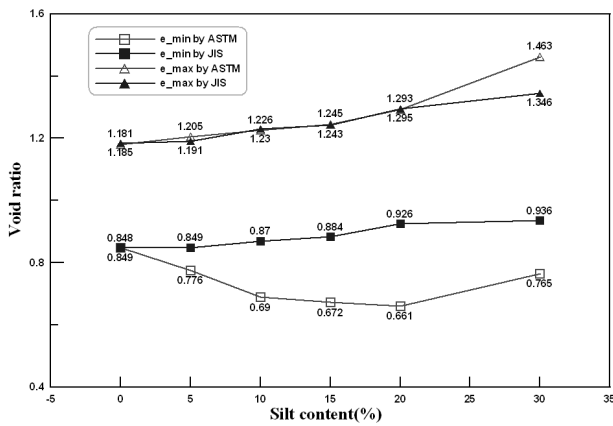


그림 5. ASTM과 JIS방법을 이용하여 구한 간극비

JIS 방법도 ASTM 방법과 마찬가지로 규정된 작은 몰드 안에 실트함유율에 따라 건조된 시료를 서서히 몰드 속으로 붓는데, 몰드 양 옆을 steel bar로 충분히 두드려서 시료의 간극 속에 있는 공기를 최대한 제거시킨다. 최소간극비 결정 방법은 양 옆의 steel bar를 100회 이상을 두드려 시료가 더 이상 들어갈 수 없을 만큼 넣고, 최대간극비 결정방법은 steel bar를 사용하지 않고 아무런 두드림 없이 그냥 서서히 시료를 넣은 후에 산정하였다. 사진 1은 ASTM과 JIS 규정의 최대 및 최소간극비 시험기구이다.

이와 같은 과정으로 산정된 실트함유율에 따른 실트질 모래의 최대 및 최소간극비는 그림 5와 같다. 그림 5에서 알 수 있듯이 세립분을 포함하는 모래의 경우 ASTM과 JIS 방법 모두 세립분이 많을수록 최대간극비는 증가함을 확인할 수 있으나 최소간극비의 경우 차이가 나타났다. ASTM 방법의 경우 실트함유율이 20%까지 최소간극비가 감소하다가 다시 증가하였다. JIS 방법은 실트함유율이 증가함에 따라 최소간극비도 증가함을 보였다. 이는 JIS방법의 경우 타격을 함에 따라 모래와 실트의 분리가 이루어졌음에 반해 ASTM의 경우 시료 상부에 중량을 가진 몰드를 놓음에 따

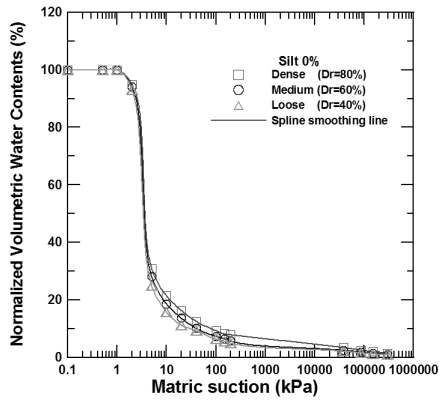
표 4. 상대밀도에 따른 실트질 모래의 상태

Sample state	Silt contents (%)	Dry unit weight (kgf/m ³)	Void ratio, e	Dr (%)
Dense	0	1.377	0.915	80
	10	1.501	0.759	80
	20	1.520	0.735	80
	30	1.513	0.744	80
Medium	0	1.331	0.982	60
	10	1.408	0.876	60
	20	1.407	0.875	60
	30	1.402	0.882	60
Loose	0	1.287	1.048	40
	10	1.325	0.992	40
	20	1.310	1.014	40
	30	1.306	1.019	40

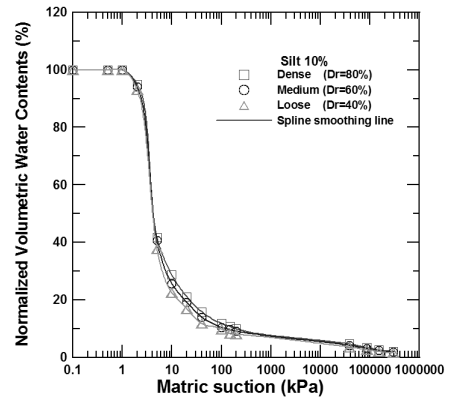
라 모래사이에 세립분이 위치하여 시험결과와의 차이가 낮고 판단하였다. 이에 ASTM 시험결과를 이용하여 본 연구에서 사용한 상대밀도 40%, 60%, 80%의 조건을 표 4와 같이 구하여 시료를 성형하였다.

3. 시험 결과

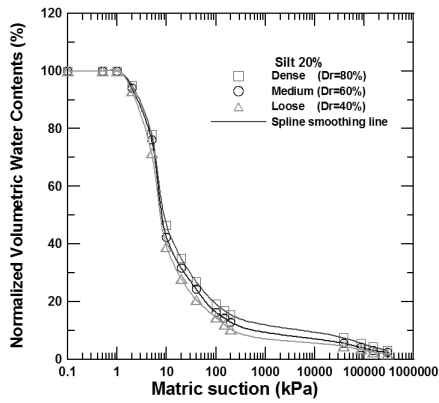
표 4에서 얻어진 결과를 이용하여 실트함유율과 상대밀도 변화에 따른 실트질 모래의 불포화함수특성시험을 실시하여 그림 6과 그림 7에 실트함유율과 상대밀도별 함수특성곡선을 정규화된 체적함수비로 도시하였다. 정규체적함수비(normalized volumetric water content)는 시료의 포화도와 같은 개념으로 시료별 포화함수비 차이를 제거하여 정확한 비교를 하기 위한 것이다. 그림 6은 동일 실트함유율에 의한 함수특성곡선으로 각 실트함유율에서 상대밀도에 따라 큰 차이는 아니지만 일반적으로 상대밀도가 증가함에 따라 같



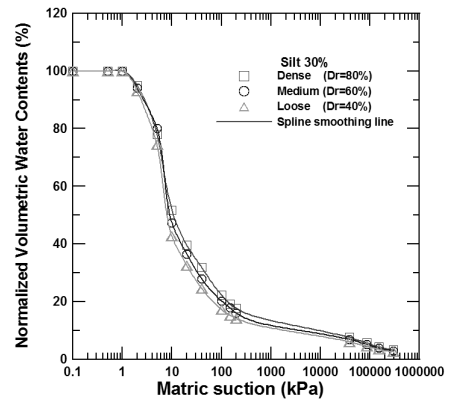
(a) silt 0%



(b) silt 10%

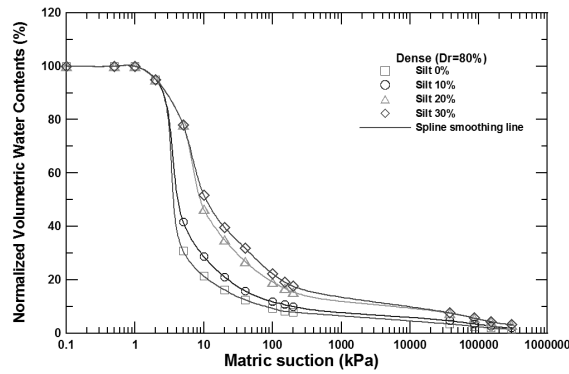


(c) silt 20%

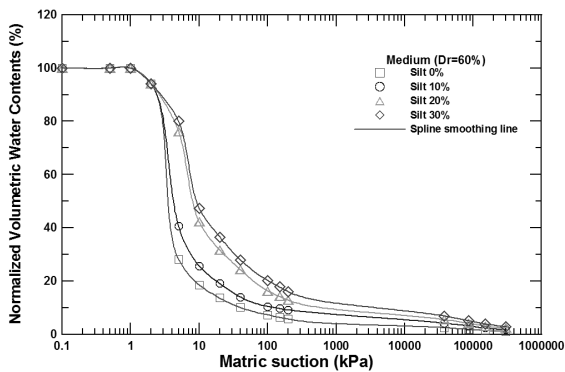


(d) silt 30%

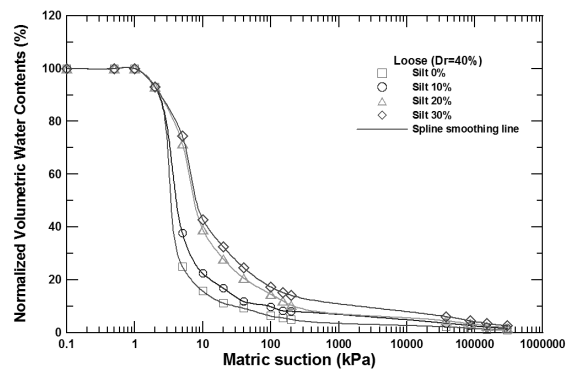
그림 6. 실트함유율별 함수특성곡선



(a) 상대밀도 80%



(b) 상대밀도 60%



(c) 상대밀도 40%

그림 7. 상대밀도별 함수특성곡선

은 흡인력에서 정규체적함수비가 크게 나타났다. 또한 실트 함유율이 함수특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동일 상대밀도에서 실트함유율 변화에 따른 함수특성곡선을 그림 7과 같이 나타내었다. 모든 경우에서 간극이 큰 모래의 특성으로 인하여 작은 흡인력(1~10kPa)에도 정규체적함수비가 급격히 감소하였다. 그리고 실트함유율이 증가함에 따라 그림 6의 상대밀도 증가일 때와는 달리 정규체적함수비가 아주 뚜렷하게 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 실트함유율 증가에 의하여 높은 흡수력에서도 실트 입자 내에 많은 수분이 유지되고 있음을 의미한다.

표 4에서 알 수 있듯이 실트함유율이 증가하게 되면 동일한 상대밀도를 유지하기 위해서는 대체적으로 단위중량이 증가하고 간극비는 감소하게 된다. 조밀한 시료의 경우 실트함유율이 0%일 때 간극비는 0.915이며 실트함유율이 10%일 때는 0.759까지 감소하게 된다. 그러나 실트함유율 20%와 30%의 경우는 10%의 간극비와 비슷한 0.735와 0.744의 값을 가진다. 중간상태의 시료와 느슨한 시료의 결과도 동일하다. 즉, 시험결과에서 확인이 가능한 것은 실트함유율 0%를 제외한 10%, 20%, 30%의 시료의 경우 초기간극비가 크게 차이 나지는 않으나 동일 흡인력에 대한 정규체적함수비 변화폭이 다르다는 것이다. 이는 조립토인 모래에서 세립분이 더해질 경우 간극비만으로는 함수특성을 설명할 수 없음을 의미하며, 실트함유율이 높아질수록 변화의 폭이 작아지므로 모관력보다 표면력이 더 크게 영향을 준다는 것이다. 또한 동일 실트함유율에 대해서는 상대밀도가 커질수록 체적함수비의 변화가 작아지고, 동일 상대밀도에서는 실트함유율이 커질수록 높은 함수비를 유지함으로써 체적함수비의 변화가 작아짐을 알 수 있었다. 그리고 흡인력변화에 따른 함수비의 변화를 확인하여 본 결과, 낮은 흡인력에서

실트함유율의 변화에 따른 함수비의 변화가 더 크며 흡인력이 클수록 그 변화폭이 작아짐을 확인하였다. 그리고 실트함유율 변화의 영향에 비하여 상대밀도가 미치는 영향이 적다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 간극 내 모관력(간극의 크기와 상대밀도의 영향)보다는 물분자를 흡착하는 흡입자의 표면력(실트입자 수분흡착력)이 더 큰 영향을 줬다고 판단할 수 있다. 이는 변곡점 경사의 차이를 통해서도 확인할 수 있는데, 변곡점의 경사는 모든 상대밀도에서 실트함유율이 증가할수록 경사가 완만해졌으며 이는 실트입자가 많아짐으로서 흡입자의 표면력이 증가하여 물의 흐름에 방해가 주었기 때문이다.

또한 모든 상대밀도에서 실트함유율에 상관없이 공기함입치와 잔류함수비는 거의 차이가 나지 않았다. 실트가 함유되더라도 시료의 간극이 크므로 흡입자의 표면력에 상관없이 작은 흡인력에도 물의 흐름이 생긴 것으로 판단되며, 높은 흡인력에서는 모관력에 의한 저항은 완전히 없어지고 흡입자의 표면력에 의한 저항도 최소화되어 실트함유율이 증가하더라도 큰 차이가 나타나지 않는 것으로 판단된다.

4. 경험식에 의한 함수특성곡선

본 장에서는 기존의 여러 연구자(Gardner, 1958; Brooks 등, 1964; van Genuchten, 1980; William 등, 1983; Makee 등, 1984; Fredlund 등, 1994)가 제안한 함수특성곡선에 대한 경험식(표 5 참고)들의 변수를 구하여 표 6~표 11에 나타내었다. 이들 변수를 이용하여 상대밀도 80%에 대한 경험식에 의한 함수특성곡선을 그림 8에 도시하였다.

경험식을 통해 얻은 함수특성곡선과 시험에서 구한 결과를

표 5. 함수특성곡선 경험식

경험식 제안자	경험식	변수	비고
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + a\psi^n}$	a, n	θ : 정규체적함수비 ψ : 모관흡인력
Brooks & corey (1964)	$\theta = S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \left[\frac{\psi_b}{\psi} \right]^\lambda$	λ, ψ_b	S_e : 유효포화도 S_r : 잔류포화도
van Genuchten (1980)	$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$	α, n, m	-
William et al. (1983)	$\ln \theta = A + B \ln \psi$	A, B	-
Makee & Bumb (1984)	$\theta = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\psi - a}{b}\right)}$	a, b	-
Fredlund & Xing (1994)	$\theta_w = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left(\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right] \right)^m}$	α, n, m	$C(\psi)$: 보정계수 θ_s : 포화함수비 e : 자연수(2.718...) ψ : 모관흡수력

표 6. Gardner(1958)의 변수와 상관계수

Sample state	Silt contents (%)	Gardner(1958)		
		a	n	R ²
Dense	0	0.038	2.222	0.96
	10	0.082	1.414	0.96
	20	0.079	0.959	0.97
	30	0.084	0.868	0.97
Medium	0	0.023	2.714	0.97
	10	0.069	1.593	0.96
	20	0.074	1.051	0.97
	30	0.080	0.933	0.97
Loose	0	0.014	3.207	0.98
	10	0.055	1.842	0.97
	20	0.071	1.149	0.98
	30	0.083	0.999	0.97

표 7. Brooks and corey(1964)의 변수와 상관계수

Sample state	Silt contents (%)	Brooks and corey(1964)		
		λ	n	R ²
Dense	0	0.264	4.38.E+05	0.79
	10	0.245	1.46.E+06	0.82
	20	0.198	7.10.E+07	0.85
	30	0.188	1.95.E+08	0.87
Medium	0	0.275	2.46.E+05	0.78
	10	0.251	9.36.E+05	0.81
	20	0.208	2.61.E+07	0.85
	30	0.195	9.30.E+07	0.86
Loose	0	0.282	1.64.E+05	0.77
	10	0.260	5.56.E+05	0.81
	20	0.219	1.02.E+07	0.84
	30	0.206	3.07.E+07	0.85

표 8. van Genuchten(1980)의 변수와 상관계수

Sample state	Silt contents (%)	van Genuchten(1980)			
		α	n	m	R ²
Dense	0	0.551	58.79	0.015	0.98
	10	0.578	58.35	0.011	0.99
	20	0.402	4.23	0.109	0.99
	30	0.429	4.13	0.087	0.99
Medium	0	0.544	64.93	0.016	0.99
	10	0.573	58.36	0.012	0.99
	20	0.387	3.88	0.135	0.99
	30	0.389	3.79	0.119	0.99
Loose	0	0.540	70.89	0.016	0.99
	10	0.569	57.76	0.014	0.99
	20	0.402	3.70	0.154	0.99
	30	0.429	3.76	0.129	0.99

비교하여 보면, 시험결과는 그림 6과 그림 7에서 보듯이 함수 특성곡선의 형태는 S자형 곡선을 나타내는데, Gardner(1958), Brooks와 Corey(1964), William 등(1983), 그리고 Makee와 Bumb(1984)의 경험식에 의한 곡선은 어느 정도의 경향은 설명할 수 있으나 시험결과와 다소 상이한 결과를 보였다.

표 9. William et al.(1983)의 변수와 상관계수

Sample state	Silt contents (%)	William et al.(1983)		
		A	B	R ²
Dense	0	4.234	-0.265	0.79
	10	4.275	-0.245	0.82
	20	4.383	-0.198	0.85
	30	4.402	-0.189	0.87
Medium	0	4.212	-0.275	0.78
	10	4.261	-0.252	0.81
	20	4.364	-0.209	0.85
	30	4.389	-0.196	0.86
Loose	0	4.195	-0.283	0.77
	10	4.243	-0.261	0.81
	20	4.341	-0.220	0.84
	30	4.364	-0.207	0.85

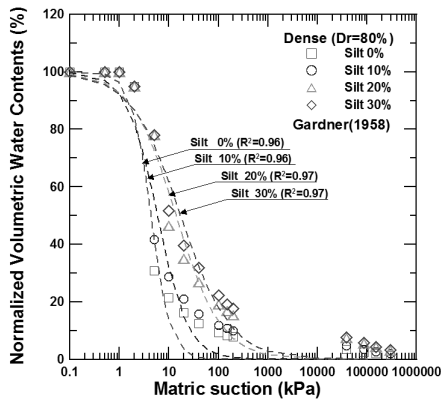
표 10. Makee and Bumb(1984)의 변수와 상관계수

Sample state	Silt contents (%)	Makee and Bumb(1984)		
		a	b	R ²
Dense	0	-0.117	3.856	0.95
	10	-0.494	5.227	0.94
	20	-2.715	13.421	0.92
	30	-4.093	17.169	0.90
Medium	0	-0.046	3.546	0.96
	10	-0.373	4.796	0.95
	20	-2.101	11.391	0.94
	30	-3.045	14.393	0.92
Loose	0	0.016	3.261	0.96
	10	-0.250	4.316	0.96
	20	-1.594	9.553	0.95
	30	-2.287	11.657	0.93

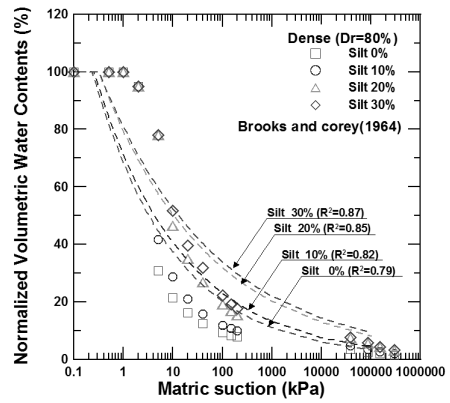
표 11. Fredlund and Xing(1994)의 변수와 상관계수

Sample state	Silt contents (%)	Fredlund and Xing(1994)			
		a	n	m	R ²
Dense	0	2.434	7.480	0.685	0.99
	10	2.627	5.221	0.687	0.99
	20	4.303	3.104	0.703	0.99
	30	4.227	2.418	0.720	0.99
Medium	0	2.443	7.003	0.771	0.99
	10	2.626	4.970	0.743	0.99
	20	4.278	3.033	0.781	0.99
	30	4.427	3.062	0.694	0.99
Loose	0	2.380	7.411	0.805	0.99
	10	2.580	4.995	0.791	0.99
	20	4.057	2.714	0.895	0.99
	30	4.021	2.738	0.788	0.99

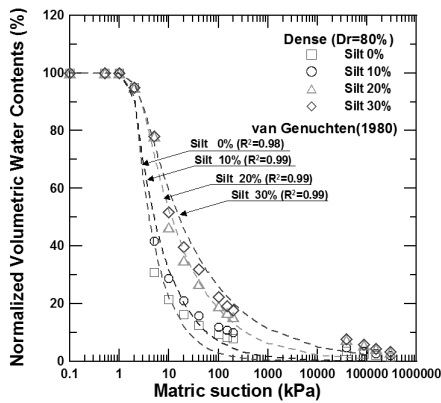
그에 비하여 van Genuchten(1980), Fredlund와 Xing(1994) 경험식에 의한 함수특성곡선은 시험결과의 경향과 비슷한 S자형 곡선을 나타내어 비교적 시험결과와 잘 부합하였다. 이와 같은 결과는 그래프와 표에 표시된 상관계수(R²)의 설명력으로 설명이 가능하다. 먼저 Brooks와 Corey, William



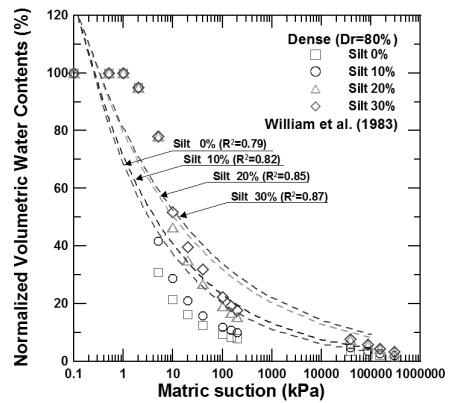
(a) Gardner(1958)



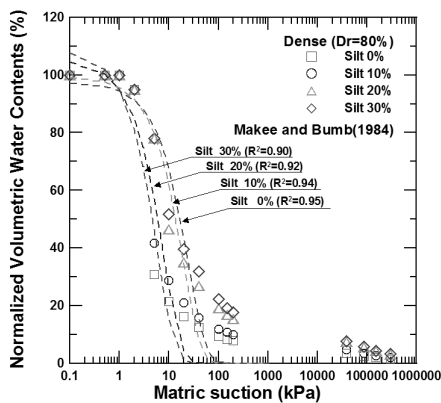
(b) Brooks & corey(1964)



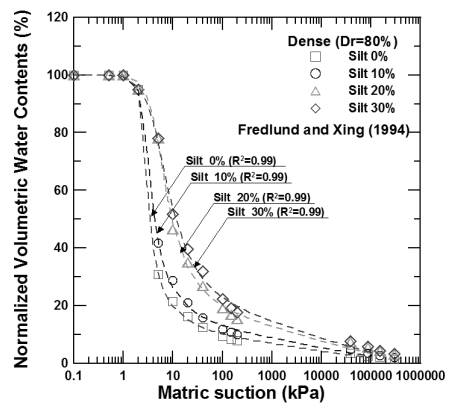
(c) van Genuchten(1980)



(d) William(1983)



(e) Makee & Bumb(1984)



(f) Fredlund & Xing(1994)

그림 8. 경험식에 의한 함수특성곡선(상대밀도 80%)

등의 경험식은 공기함입치에 대한 표현이 약하며, Gardner, Makee와 Bumb의 경험식은 잔류함수비에 대한 표현이 약한 것을 그림 8의 (a)와 (e)를 통해서 확인할 수 있다. 반면 Fredlund와 Xing 경험식의 경우 그림 8의 (f)에서 확인되듯이 공기함입치와 잔류함수비는 물론 실트함유율의 변화에 따른 함수특성곡선의 변화도 잘 설명하였다. 이는 변수를 세 가지로 하여 곡선의 변화범위를 다양하게 반영하였기 때문이다.

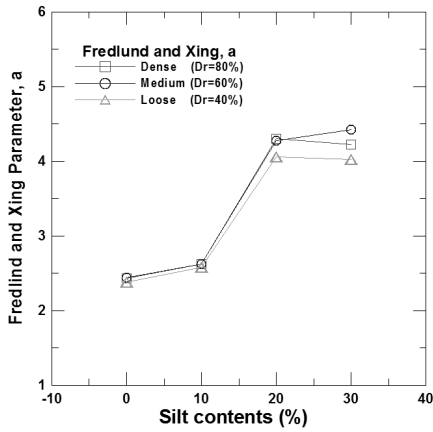
시험결과를 보다 자세히 분석하기 위하여 S자 형태 곡선

을 나타내어 시험결과와 잘 일치한다고 알려져 있으며, 또한 본 연구의 가장 잘 일치되는 것을 확인한 Fredlund와 Xing의 경험식 변수를 이용하여 설명하고자 한다. Fredlund와 Xing의 경험식 인자 즉, 맞춤변수는 a , n , m 이며, 각 변수는 경험식에서 곡선의 변화와 관련되어 있다. 맞춤변수 a 는 공기함입치와 관련된 값으로 일반적으로 공기함입치보다 큰 값을 가지고 함수특성곡선의 변곡점에서의 포화흡수력으로 정의된다. 맞춤변수 m 이 작은 경우 a 는 공기함입치로 정의되기도 한다. 그리고 맞춤변수 n 은 함수특성곡선의 기울기와 관

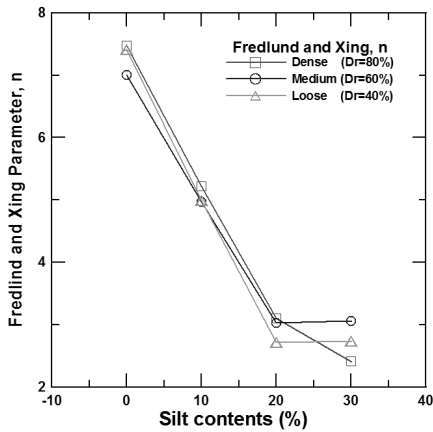
런되어 있으며, m 은 높은 모관흡수력 범위에서의 변화 즉, 잔류함수비와 관련이 있다.

그림 9에 Fredlund와 Xing의 경험식 인자 a , n , m 을 실트 함유율 변화에 따라 대하여 도시하여 나타내었다. a , n , m 은 함수특성곡선의 묘사할 수 있는 변수들로 a 는 공기함입치와 관련된 맞춤변수로 실트함유율이 증가함에 따라 뚜렷한 증가경향을 나타내었다. 그러나 그 범위는 2.380~4.427로

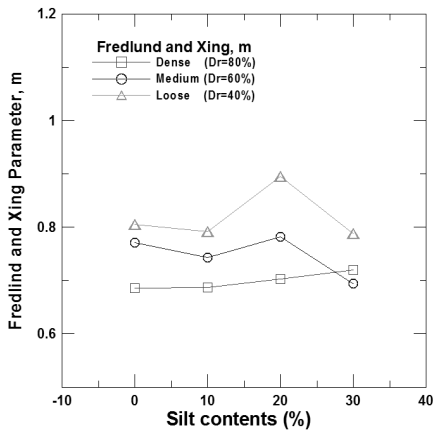
변화범위는 작아서 함수특성곡선에서 확인되듯이 큰 차이가 없었다. 맞춤변수 n 은 곡선의 기울기와 관련된 변수로 실트함유율이 증가함에 따라 뚜렷한 감소 경향을 나타내었는데, 본 연구의 시험결과에서 가장 뚜렷이 구분될 수 있는 부분으로서 실트함유율이 증가함에 따라 곡선의 기울기가 감소하였다. 맞춤변수 m 은 잔류함수비와 관련된 변수로 실트함유율의 변화와 관계없이 일정한 값을 나타내었다. 그림 9를 통하여 사용되는 계수를 실트함유율에 따라 변수를 대



(a) Parameter a

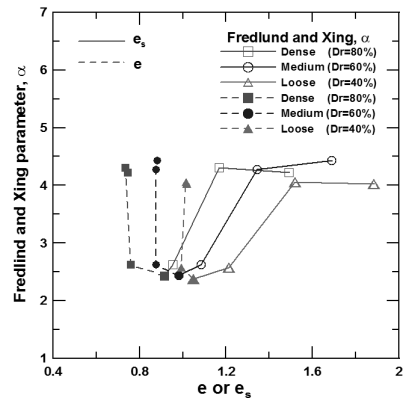


(b) Parameter n

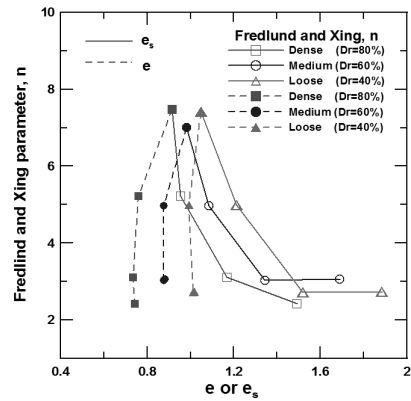


(c) Parameter m

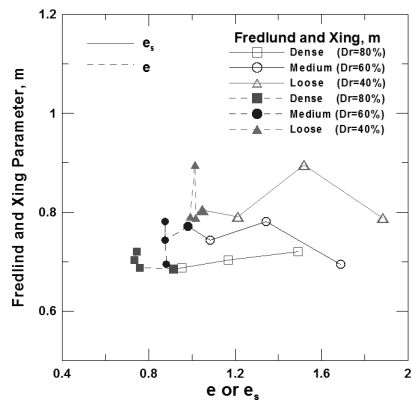
그림 9. 실트함유율과 Fredlund & Xing 경험식의 맞춤변수



(a) Parameter a



(b) Parameter n



(c) Parameter m

그림 10. 간극비 및 상호입자 간극비와 Fredlund & Xing 경험식의 맞춤변수

략적으로 결정할 수 있으나 실트함유율 20%를 넘어서는 범위의 값은 큰 차이가 나지 않는다. 또한 함수특성은 상대밀도에 영향을 받지 않았으며, 이 역시 계수의 값이 차이가 없는 것으로 확인되었다.

그림 10에 간극비와 맞춤변수 그리고 상호입자 간극비(intergranular void ratio, e_s)와 맞춤변수에 대하여 도시하였다. 상호입자 간극비는 세립분을 포함한 모래에서 모래 입자의 packing condition을 나타내기 위한 것으로 다음의 식(1)과 같이 정의 된다.

$$e_s = (e + FC) / (1 - FC) \quad (1)$$

여기서, FC 는 0.002mm이하 흙입자의 통과율이다. 간극비의 경우 앞에서 설명한 바와 같이 실트함유율 0%를 제외하고는 실트함유율의 변화에 상관없이 비슷한 간극비를 가지게 된다. 이러한 결과로 그림 10에서 모든 맞춤변수에서 간극비의 증가와 감소에 대해서 맞춤변수의 변화를 정확히 설명할 수가 없다. 반대로 상호입자 간극비의 경우는 그래프 경향이 실트함유율과 동일하게 나타날 뿐 아니라 상호입자 간극비의 변화에 대한 변수의 변화를 확인할 수 있다. 그러므로 세립분이 포함된 조립질 시료의 경우는 상호입자 간극비가 간극비보다 함수특성을 나타내기에 더 효율적이라고 할 수 있다. 그러나 실제로 이 그림을 이용하기는 한계가 있다. 본 시험결과는 동일 실트함유율에서는 상대밀도와 상관없이 동일한 결과가 나타났으나 그림 10에서 확인되듯이 상대밀도가 변화함에 따라 간극비가 차이가 나타나 변수의 값은 변화가 없다. 이는 불포화함수특성의 경우 간극의 변화로만으로 설명할 수 없기 때문이다.

5. 결 론

불포화토의 지반공학적 문제 해결에 있어서 먼저 고려하여야 할 것은 시료의 함수특성을 얻는 것으로 본 연구에서는 낙동강 모래를 이용하여 세 가지 상대밀도와 다양한 실트함유율에 대하여 함수특성곡선을 구하여 그 변화를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실트함유율과 상대밀도 변화에 따른 낙동강 실트질 모래의 불포화함수특성시험을 실시하여 흡인력에 따른 정규화된 체적함수비로 도시한 결과, 동일 실트함유율에 의한 함수특성곡선에서는 각 실트함유율에서 상대밀도에 따라 큰 차이는 아니지만 일반적으로 상대밀도가 증가함에 따라 같은 흡인력에서 정규체적함수비가 크게 나타났다.

- (2) 동일 상대밀도에서 실트함유율 변화에 따른 함수특성곡선에서는 모든 경우에서 간극이 큰 모래의 특성으로 인하여 작은 흡인력(1~10kPa)에도 정규체적함수비가 급격히 감소하였다. 그리고 실트함유율이 증가함에 따라 정규체적함수비가 아주 뚜렷하게 증가하여 실트함유율 높아짐에 따라 실트입자의 높은 수분흡착력에 의하여 많은 수분이 입자 내에서 유지되었다.
- (3) 동일 실트함유율에 대해서는 상대밀도가 커질수록 체적함수비의 변화가 작아지고, 동일 상대밀도에서는 실트함유율이 커질수록 체적함수비의 변화가 작게 나타났다. 실트함유율 변화의 영향에 비하여 상대밀도가 미치는 영향이 더 적다는 것을 확인하였다. 이를 통해 간극 내 모관력(간극의 크기와 상대밀도의 영향)보다는 물 분자를 흡착하는 흙입자의 표면력(실트입자 수분흡착력)이 함수특성곡선에 더 큰 영향을 줬다고 판단할 수 있다.
- (4) 기존의 경험식을 통해 구한 함수특성곡선과 시험에서 구한 결과를 비교하여 보면, Gardner(1958), Brooks와 Corey(1964), William 등(1983), 그리고 Makee와 Bumb(1984)의 경험식은 어느 정도의 경향은 설명할 수는 있으나 시험결과와 다소 상이하였으며, van Genuchten(1980), Fredlund와 Xing(1994) 경험식에 의한 함수특성곡선은 시험결과와 비슷한 S자형 곡선을 나타내어 비교적 시험결과와 잘 부합하였다. 특히 Fredlund와 Xing 경험식의 경우 상관계수(R^2)가 모두 0.99로 나와 거의 일치하는 결과를 보였다.
- (5) Fredlund와 Xing의 경험식 인자 a , n , m 을 실트함유율 변화에 따라 분석한 결과, a 는 공기함입치와 관련된 맞춤변수로 실트함유율이 증가함에 따라 뚜렷한 증가 경향을 나타내었다. 맞춤변수 n 은 곡선의 기울기와 관련된 변수로 실트함유율이 증가함에 따라 뚜렷한 감소 경향을 나타냈으며, 맞춤변수 m 은 잔류함수비와 관련된 변수로 실트함유율의 변화와 관계없이 일정한 값을 보였다. 간극비와 상호입자 간극비로 맞춤변수와의 관계를 알아본 결과 간극의 변화로만으로는 불포화함수특성을 설명할 수가 없었다.

감사의 글

이 논문은 “진주산업대학교 2010년도 기성회 연구비 지원”에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Annual Book of ASTM Standards(2007), *Section Four Construction, Soil and Rock(I-1) D420-D5611*, Vol. 04.08, pp. 518~541.
2. Brooks, R. H. and Corey, A. T.(1964), Hydraulic Properties of Porous Medium, Colorado State Univ., *Hydrology Paper*, No. 3, 27 p.
3. Fredlund, D. G. and A. Xing(1994), Equation for the Soil-water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 521~532.
4. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc., NY, pp. 64~123.
5. Gardner W. R.(1958), Some Steady State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 85, Issue 4, pp. 228~232.
6. Japanese Industrial Standards(2000), *Japanese Geotechnical Society, Division A(Civil Engineering and Architecture)*, p. 1224.
7. MaKee, C. R., and Bumb, A. C.(1984), *Flow-testing Coalbed Methane Production Wells in Presence of Water and Gas*, SPE Formation Evaluation, Dec., pp. 599~608.
8. van Genuchten, M. Th.(1980), A Closed-form Equation of Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892~898.
9. Williams, J., Prebble, R. E., Williams, W. T. and Hignett, C. T.(1983), The Influence of Texture, Structure and Clay Mineralogy on the Soil Moisture Characteristic. *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 15~31.
10. Young, J. F.(1967), Humidity Control in the Laboratory using Salt Solutions-a Review, *Journal of application Chemistry*, Vol. 17, Issue 9, pp. 241~245.

(접수일: 2010. 11. 9 심사일: 2010. 11. 24 심사완료일: 2010. 12. 10)