

## 불포화 사질토의 전단특성

### The Shear Characteristics of Unsaturated Sandy Soils

임 성 윤<sup>1</sup>      Lim, Seong-Yoon

#### Abstract

Since matric suction of unsaturated soil was related to soil and ground water contaminations, it is very important to analyze its mechanism that was represented by shear characteristics. In three phases of soil, a little air makes the condition of unsaturated soil on contract or shrinkage surface between water and air. Capillarity and suction in pore of unsaturated soil cause surface tension and surface force so it makes negative pore water pressure and increases effective stress as a result. Therefore, negative pore water pressure in partially saturated soil affects the soil structure and degree of saturation and it is important to evaluate accurately unsaturate flow and behavior. In this study, the shear strength characteristics of the seven sandy soils were investigated using consolidated drained triaxial tests with special emphasis on the effects of the negative pore pressure and the matric suction. These tests involved shearing under either a constant net confining pressure and varying matric suction or under a constant matric suction and varying net normal stress.

#### 요 지

현재 불포화토에 대한 많은 연구가 진행되어 왔고 최근 들어 많은 연구자들이 불포화지반의 안정성을 보다 합리적으로 판단하고 해석하기 위해 불포화상태를 고려한 연구의 필요성을 제기하여 왔다. 이를 위해서는 흡인력에 대한 전단강도의 증진효과를 정량화하고 이를 안정해석에 적용하는 것이 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 불포화 사질토의 전단강도 특성을 규명하기 위해서 국내에 널리 분포하는 화강풍화토 7가지를 대상으로 불포화 삼축압축시험을 수행하였으며, 결과치를 분석하여 강도특성을 규명하고자 한다.

**Keywords :** Matric suction, Shear strength of unsaturated soils, Unsaturated soils

#### 1. 서론

많은 연구자들은 불포화영역에서 불포화토의 공학적 특성이 흡인력에 영향을 받는 것에 착안하여 함수특성을 위한 모델에 사용하는 계수들을 예측하는 방법에 많은 노력을 기울여 왔다. 불포화토지반의 경우에 흡인력이 지반의 거동특성에 매우 중요한 역할을 하는 설계변수이므로 불포화지반과 관련된 흐름과 강도특성을 적

절히 고려하기 위해서는 흡인력의 영향을 고려할 필요성과 중요성이 대두되고 있는 실정이다.

불포화토에 대한 연구는 유효응력 개념을 적용한 유효응력식이 Bishop(1959)에 의해 처음 발표된 후, Seed etc(1960)은 다진 점토에 대하여 직접전단시험을 실시하였으며 그 결과 다진 점토의 전단강도는 밀도, 함수비와 흙의 구조에 따라 많은 영향을 받는다고 보고하였다. Jenning & Burland(1962)은 사질토에 대해 함수비를 조

<sup>1</sup> 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구원, 공학박사 (Member, Researcher, Structure & Geotechnical Research Division Expressway & Transportation Technology Institute, soilab73@naver.com)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

절하여 직접전단실험을 실시하였으며 실험결과로부터 유효응력 개념으로 불포화토의 전단거동을 어느 정도 표현할 수 있으나 체적거동은 나타낼 수 없음을 지적하면서 응력변수를 순평균응력과 흡인력 항으로 분리할 것을 제안하였다.

Fredlund 등(1977, 1978, 1979)은 Jennings 등의 개념을 바탕으로 공기압과 간극수압의 차인 흡인력과 축응력과 간극공기압의 차인 순구속압의 항을 분리한 응력변수를 사용하여 다진 불포화시료에 대하여 전단강도식을 발표하였다.

Escario & Saez(1986)은 흡인력을 조절하면서 불포화토에 대하여 직접전단시험을 실시한 결과, 전단강도와 흡인력은 비선형 관계에 있다고 보고하였으며, Gan 등(1988)은 직접전단시험의 결과로부터  $\phi^b$ 가 포화시 내부마찰각( $\phi$ )과 같은 크기를 가지는 반면 흡인력이 증가하면 내부마찰각( $\phi$ )보다 적은 값을 가진다고 발표하였다.

Wheeler(1988, 1992)는 불포화 해성점토의 비배수전단강도는 흡인력에 따라 비선형적으로 증가하며 내부마찰각과 점착력도 비선형적으로 증가하며 점착력의 증가분은 비선형적으로 감소한다고 발표하였다.

송(1994)은 실내실험을 통하여 불포화토의 응력 및 체적변화에 영향을 주는 인자를 규명하고 인자 상호간의 관계를 도출하여 불포화토의 거동 예측을 위한 구성식을 개발하고, 실내실험의 자료로부터 구한 관측치와 예측치를 비교하여 이의 타당성을 검증하였다.

현재 불포화토에 대한 많은 연구가 진행되어 왔고 최근 들어 많은 연구자들이 불포화지반의 안정성을 보다 합리적으로 판단하고 해석하기 위해 불포화상태를 고려한 연구의 필요성을 제기하여 왔다. 이를 위해서는 흡인력에 대한 전단강도의 증진효과를 정량화하고

이를 안정해석에 적용하는 것이 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 불포화 사질토의 전단강도 특성을 규명하기 위해서 국내에 널리 분포하는 화강포화토 7가지를 대상으로 불포화 삼축압축시험을 수행하였으며, 결과치를 분석하여 강도특성을 규명하고자 한다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 재료

사용된 흙은 경기도 양주시 장흥면에서 채취하였으며, 대부분 풍화가 심하게 진행된 것으로 나타났다. 채취한 시료는 7가지로 통일분류법상 SC에 해당되며 #200 통과량이 50%이하이며, 저소성의 사질토 성분이 함유된 흙으로 J-1부터 J-7까지로 표시하였으며 물리적 성질은 Table 1과 같다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 공시체 제작

포화상태의 경우는 불교란 시료를 트리밍하여 공시체를 제작한 후, 배압을 통해 공시체를 포화시킨 후 실험을 진행하였다. 그리고, 불포화상태의 경우는 흙수분 특성곡선(SWCC)에서 구한 흡인력에 대한 값에 나타난 함수비를 바탕으로 하여 몰드(H=7.0cm, D=3.5cm)에 시료를 3층 다짐으로 공시체를 제작한 후, 축변환기법을 적용하여 공기압과 하부간극수압을 통해 요구되는 실험조건으로 전단을 실시하였다. 여기서, 흡인력이란 간

Table 1. Physical properties of soil samples

Sample	LL (%)	PI (%)	$G_s$	Grain size distribution(%)				$\gamma_d$ (tf/m <sup>3</sup> )	e	USCS
				4.76 mm	2.0 mm	0.42 mm	0.074 mm			
J-1	42.9	12.9	2.75	99.1	89.9	53.1	13.7	1.52	0.802	SC
J-2	32.7	10.0	2.69	93.2	80.0	48.9	19.7	1.30	1.075	SC
J-3	32.3	10.1	2.55	96.6	91.4	56.5	20.0	1.30	0.962	SC
J-4	43.0	8.6	2.83	99.3	88.8	54.7	23.8	1.50	0.884	SC
J-5	30.5	10.4	2.66	97.7	76.6	48.3	13.5	1.58	0.696	SC
J-6	41.7	15.6	2.63	95.6	83.4	56.8	21.2	1.45	0.818	SC
J-7	33.6	10.5	2.65	96.3	87.2	49.9	29.9	1.34	0.979	SC

극공기압과 간극수압의 차이( $u_a - u_w$ )를 나타낸다.

공시체의 초기조건은 공기압을 50kPa로 일정하게 하고 간극수압을 포화시는 50kPa, 그리고 불포화토의 경우에는 간극수압을 각각 60kPa, 100kPa, 150kPa로 조절하여 흡인력을 재현하였다. 또한 공시체를 성형한 후 함수비를 측정하여 흡인력을 확인하였으며 무게를 측정하여 간극비를 확인하였다.

### 2.2.2 실험기구 및 방법

불포화토의 포화도 또는 흡인력에 따른 강도변화를 측정하기 위해 일반 포화삼축압축시험기의 삼축셀을 불포화토의 조건에 맞도록 개량하였다. 삼축시험기는 삼축셀, 가압장치, 측정장치 등으로 구성되어 있다.

본 연구에서 사용된 삼축압축 시험기는 영국 GDS사에서 제작되었으며, 공기압은 공기압축펌프로 가해주고, 변형률제어방법으로 축하중을 조절하여 주며, 전단변위는 컴퓨터에 의해 제어된다. 전체적인 개요도는 Fig. 1과 같고, 개량된 삼축셀의 세부도는 Fig. 2와 같다.

불포화토의 강도특성 실험을 위해 일반삼축시험에 사용되는 삼축셀을 개량하였다. 시료에 모관흡인력을

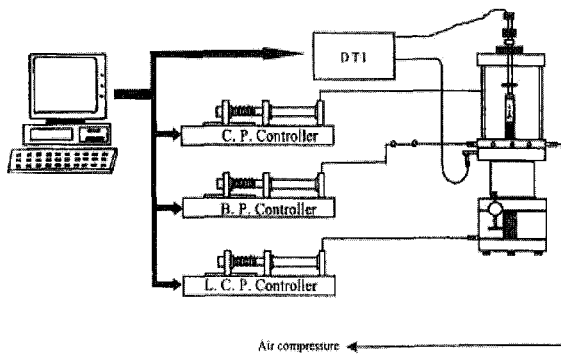


Fig. 1. Schematic lay out of unsaturated triaxial testing system

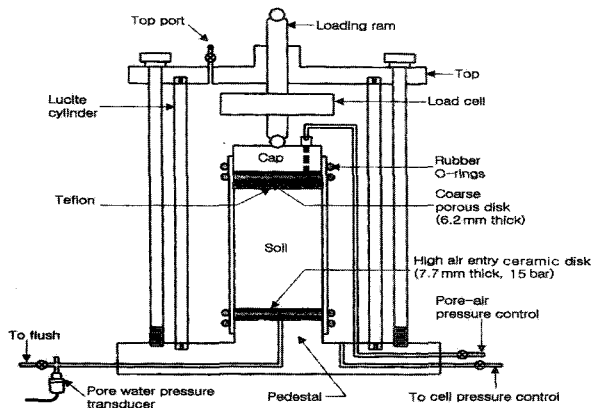


Fig. 2. Detail of the triaxial cell

재현시키기 위하여 공기압과 간극수압을 시료의 상·하단으로 가하였으며, 물을 이동시키고 공기의 이동을 제한하기 위하여 시료의 하단에 높은 공기함입저항치를 갖는 세라믹 디스크를 설치하였다. 불포화토에 대한 삼축시험은 내부에서 발생하는 간극수압의 완전한 소산을 위해 매우 느린 변형률 속도로 수행되어야 하고, 각 흡인력에서 평형을 이루는 데 필요한 시간이 매우 길어 시간소모가 크다. 본 연구에서는 대상시료에 대한 적절한 변형률 속도를 Ho와 Fredlund(1982) 등이 제안한 변형률을 기준으로 0.004mm/min의 변형률 속도를 채택하여 실험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

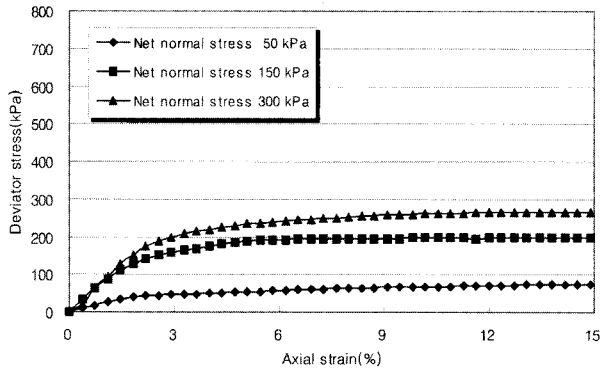
### 3.1 축차응력-변형률

#### 3.1.1 순구속압에 따른 축차응력-변형률의 변화

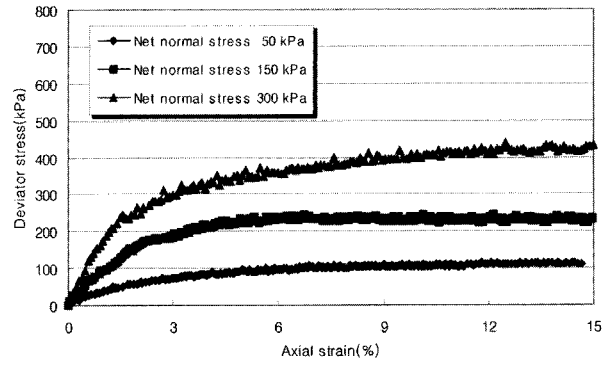
Fig. 3은 시료J-1에 대하여 흡인력을 일정하게 하고 순구속압을 달리한 경우의 축차응력-변형률의 변화를 도시한 것이다. 결과에 따르면 순구속압이 증가함에 따른 최대축차응력은 계속적으로 증가하는 경향을 보인다. 순구속압이 증가함에 따라 축차응력은 증가하는 것으로 나타났으며 축차응력이 증가하는 기울기가 커짐을 알 수 있었다. 그리고 흡인력이 0kPa인 경우 순구속압이 50kPa에서 150kPa로 증가할 때의 축차응력의 증가가 150kPa에서 300kPa으로 증가할 때보다 더 크게 나타났으나 흡인력이 증가함에 따라 순구속압이 150kPa에서 300kPa로 증가할 때의 축차응력의 증가가 50kPa에서 150kPa으로 증가할 때보다 더 크게 나타났다. 여기서 순구속압의 영향이 흡인력이 증가함에 따라 축차응력 증가에 영향을 많이 주는 것을 알 수 있었다. 또한 나머지 6개 시료에 대한 결과도 같은 경향을 나타내고 있었다.

#### 3.1.2 흡인력에 따른 축차응력-변형률의 변화

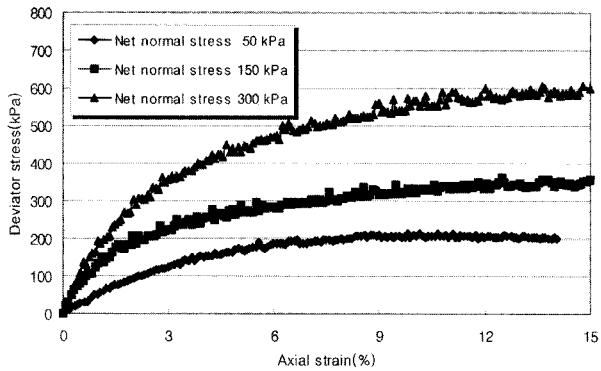
시료J-1에 대하여 순구속압을 일정하게 하고 흡인력을 달리한 경우의 축차응력-변형률의 변화를 도시하면 Fig. 4와 같다. 결과에 따르면 흡인력이 증가함에 따른 최대축차응력은 계속적으로 증가하는 경향을 보인다. 흡인력이 증가함에 따라 축차응력이 증가하는 기울기가 커짐을 알 수 있었다. 그리고 순구속압이 50kPa인 경우 흡인력이 10kPa에서 100kPa로 증가할 때의 축차



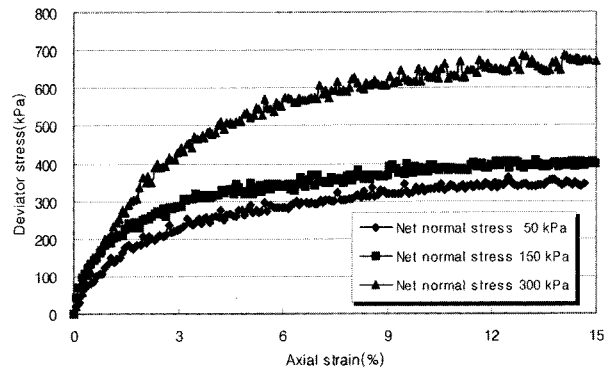
(a) Matric Suction = 0 *kPa*



(b) Matric Suction = 10 *kPa*

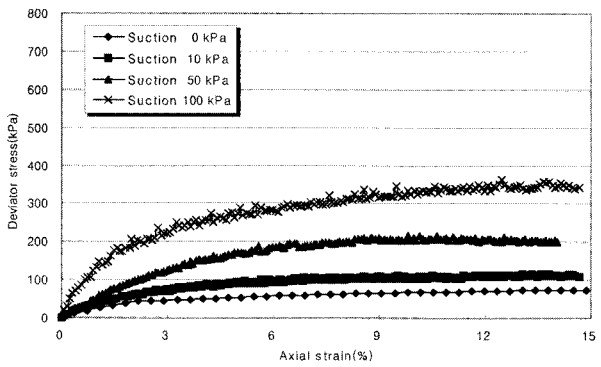


(c) Matric Suction = 50 *kPa*

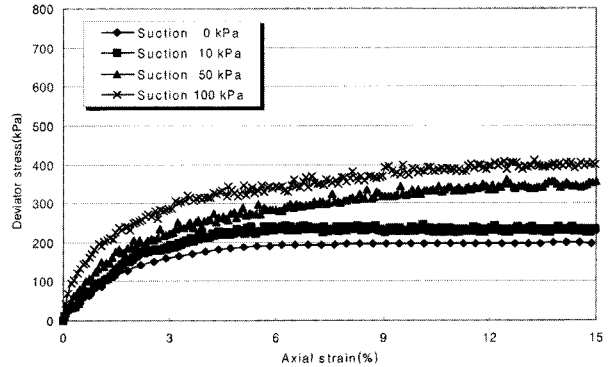


(d) Matric Suction = 100 *kPa*

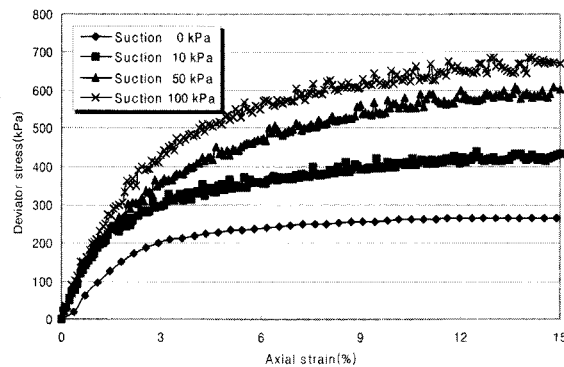
Fig. 3. Deviator stress vs. axial strain



(a) Net normal stress = 50 *kPa*



(b) Net normal stress = 150 *kPa*



(c) Net normal stress = 300 *kPa*

Fig. 4. Relationship between deviator stress and axial strain with variation of matric suction

응력 증가량이 순구속압이  $150\text{kPa}$ 과  $300\text{kPa}$ 인 경우보다 더 작음을 알 수 있다. 따라서, 순구속압이 증가하면서 흡인력에 따른 축차응력도 더욱 증가됨을 알 수 있었으며, 축차응력의 증가량은 순구속압의 변화가 흡인력의 변화보다 더 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 나머지 6개 시료에 대해서도 같은 경향을 나타내고 있었다. Fredlund 등(1978)에 의하면 흡인력에 따른 축차응력의 변화는 순구속압이 증가하면서 축차응력도 함께 증가된다고 발표하였고, 축차응력 증가량은 순구속압의 변화가 흡인력의 변화보다 더 많은 영향을 준다고 하였다.

### 3.2 불포화토의 파괴포락선

Fig. 5는 J-1시료에 대하여 흡인력이  $0\text{kPa}$ ,  $10\text{kPa}$ ,  $50\text{kPa}$ ,  $100\text{kPa}$ 일 때의 파괴포락선을 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 J-1시료의 경우 흡인력이  $0\text{kPa}$ 인 경우 점착력이  $7.22\text{kPa}$ , 내부마찰각이  $20.61^\circ$ ,  $10\text{kPa}$ 인 경우 점착력이  $16.77\text{kPa}$ , 내부마찰각이  $23.08^\circ$ ,  $50\text{kPa}$ 인 경우 점착력  $42.59\text{kPa}$ , 내부마찰각이  $26.08^\circ$ ,  $100\text{kPa}$ 인

경우에는 점착력이  $65.56\text{kPa}$ , 내부마찰각이  $26.27^\circ$ 로 나타났다. 이로부터 흡인력이 증가할수록 점착력 및 내부마찰각이 증가함을 알 수 있었으며, 다른 6개 시료에서도 같은 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다.

### 3.3 불포화토의 강도정수 특성 분석

#### 3.3.1 흡인력에 따른 점착력의 변화

선정된 7개 시료를 대상으로 흡인력의 변화에 따른 점착력의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 점착력은 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였다. 이러한 결과는 Wheeler(1988)의 해성점토에 대한 연구결과와 Krahn 등(1989)의 Notch Hill 실트에 대한 연구결과에서도 나타났다. 흡인력이 증가함에 따라 강도정수가 증가하는 이유는 흙이 건조과정에서 의하여 흡인력이 달라지면 점착력을 가지게 되어 강도가 증가한다는 것을 의미한다.

또한, 포화도의 변화에 따른 점착력의 변화를 도시하면 Fig. 7과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 점착력은 포화도가 증가할수록 감소하는 경향이 나타났다.

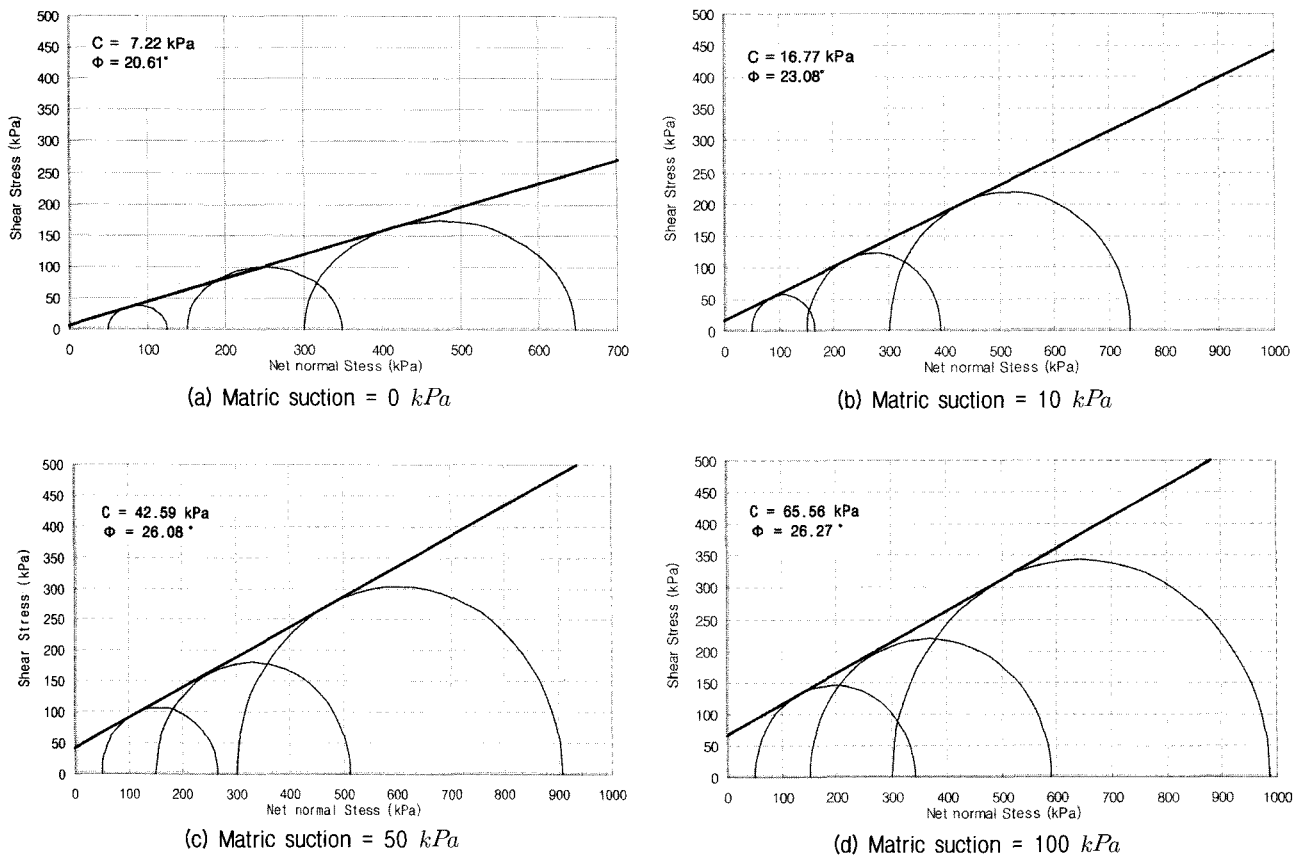


Fig. 5. Two-dimensional failure envelope projected onto the shear stress vs. net normal stress plane for J-1

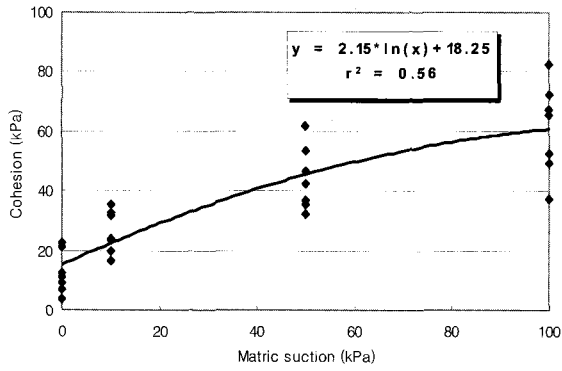


Fig. 6. Relationship between matric suction and cohesion

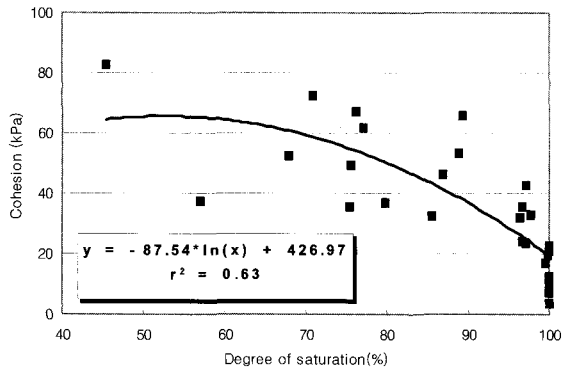


Fig. 7. Relationship between degree of saturation and cohesion

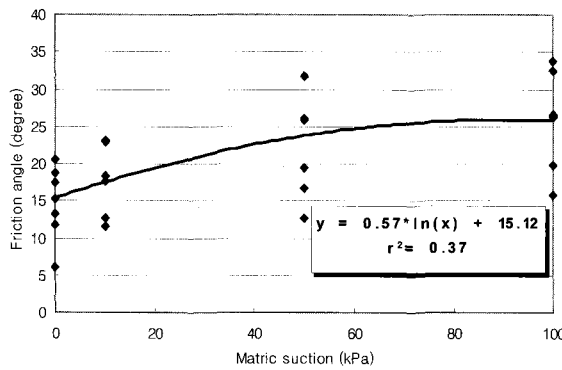


Fig. 8. Relationship between matric suction and friction angle

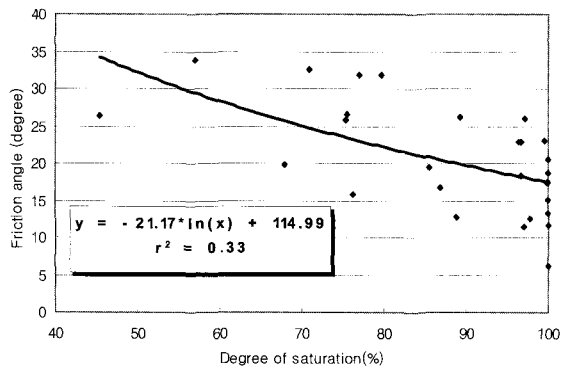


Fig. 9. Relationship between degree of saturation and friction angle

### 3.3.2 흡인력에 따른 내부마찰각의 변화

선정된 7개 시료를 대상으로 흡인력의 변화에 따른 내부마찰각의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 내부마찰각은 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였으며, 포화도가 증가할수록 감소하는 경향이 나타났다. 이는 흡인력이 증가하면 물을 중심으로 토립자가 결합하여 조립토처럼 거동하게 되어 내부마찰각도 증가되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Wheeler (1988)의 해성점토에 대한 연구결과와 Krahn등(1989)의 Notch Hill 실트에 대한 연구결과에서도 비슷하게 나타났다.

또한, 포화도의 변화에 따른 내부마찰각의 변화를 도 시하면 Fig. 9와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 내부마찰각은 포화도가 증가할수록 감소하는 경향이 나타났다.

### 3.3.3 흡인력에 따른 $\phi^b$ 의 변화

선정된 7개 시료를 대상으로 흡인력의 변화에 따른  $\phi^b$ 의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 흡인력이 증가함에 따라  $\phi^b$ 는 비선형적으로 감소하는 경향이 나타났으며, Fredlund(1987)의 전단강도 방정식에서  $\phi^b$ 는 흡인력이 증가함에 따라 증가하지 않고, 일정하게 나타난다고 발표하였다. 그러나 본 연구에서는 흡인력이 증가함에 따라  $\phi^b$ 가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 Miao 등(2002)의 Nanyang 팽창성 흙에 대한 실험결과에서도 흡인력이 증가함에 따라 전단강도는 증가하는 반면,  $\phi^b$ 는 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Toll(2000)의 다져진 불포화토의 전단거동에 대한 연구에서도 흡인력이 증가함에 따라  $\phi^b$ 도 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

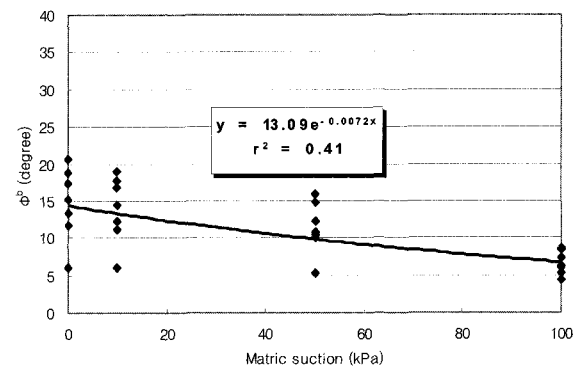
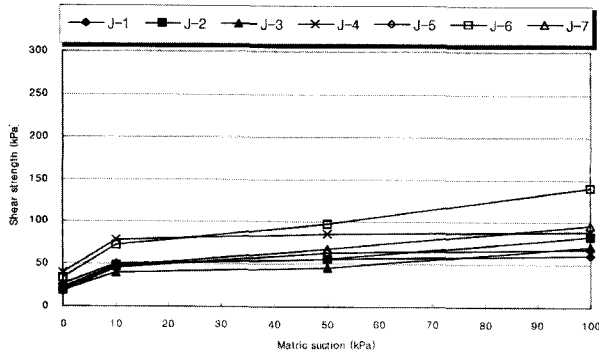
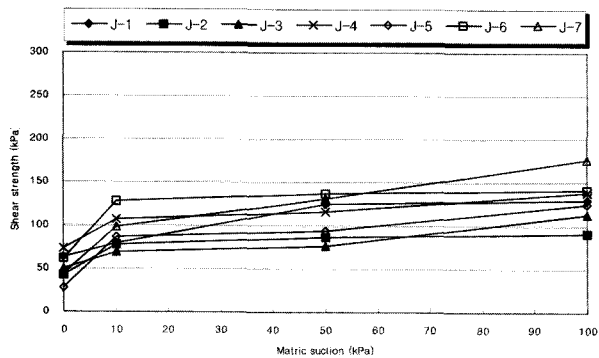


Fig. 10. Relationship between matric suction and  $\phi^b$



(a) Net normal stress = 50 kPa



(b) Net normal stress = 150 kPa

Fig. 11. Relationship between matric suction and shear strength

### 3.4 불포화도의 강도특성

불포화 삼축시험에서 얻어진 강도정수를 이용하여 순구속압이 50kPa, 150kPa, 300kPa인 상태에서 흡인력의 증가에 따른 전단강도를 도시하면 Fig. 11과 같다. 흡인력이 증가함에 따라 전단강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 흡인력에 따른 전단강도의 증가경향으로 불포화 영역에 대한 강도정수 적용시 흡인력의 고려가 필요할 것으로 판단된다. 전단강도는 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 한편 Fredlund 등(1978)은 직접전단시험의 결과로부터 선형적인 전단강도 방정식을 주장한 바 있지만, 위의 실험결과를 보면 전단강도는 흡인력에 따라 선형적으로 증가하는 것이 아니라 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 비선형적인 증가를 보이는 경향은 Escario & Saez(1986)의 직접전단시험의 결과에서도 나타났다.

## 4. 결론

사질계열 7개의 시료를 대상으로 흡인력을 0kPa, 10 kPa, 50kPa, 100kPa으로 하고 순구속압을 50kPa, 150 kPa, 300kPa으로 달리하여 불포화 삼축시험을 실시하

였으며, 이를 바탕으로 흡인력의 증가에 따른 점착력, 내부마찰각, 점착력의 증가분의 변화를 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 흡인력이 일정하고 순구속압이 증가할 경우 순구속압이 증가함에 따라 축차응력은 증가하였으며 순구속압이 일정하고 흡인력이 증가할 경우 흡인력이 증가함에 따라 축차응력은 증가하였다. 또한 축차응력의 증가는 흡인력의 증가보다 순구속압의 증가에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (2) 흡인력이 증가하고 포화도가 감소함에 따라, 점착력과 내부마찰각은 비선형적으로 증가하였으며,  $\phi^b$ 는 비선형적으로 감소하였다. 또한, 점착력, 내부마찰각,  $\phi^b$ 와 흡인력과의 관계를 함수로 나타내었다.
- (3) 불포화 삼축시험에서 얻어진 강도정수를 이용한 전단강도는 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 Fredlund(1994)가 제안한 직선적인 불포화 전단강도식이 비선형적인 불포화 전단강도식으로 사용해야 될 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 송창섭, 장병욱 (1994), "불포화도의 거동예측을 위한 구성식 개발 (I) - 불포화도의 거동특성 연구." 한국농공학회지 제36권 4호, pp.87-94.
2. Bishop, A. W. (1959), *The Principle of Effective Stress*, Publication 32, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, pp.1-4.
3. Escario, V. and J. Saez (1986), "The Shear Strength of Partly Saturated Soils", *Geotechnique*, Vol.36, No.3, pp.453-456.
4. Fredlund D.G. and H. Rahardjo (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons Inc.
5. Fredlund, D. G. and N. R. Morgenstern (1977), "Stress state variables for unsaturated soils", *ASCE J. Geotech. Eng. Div.*, Vol.103, GTS, pp.447-466.
6. Fredlund, D. G. (1979), "Second Canadian Geotechnical Colloquium : Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, No.1, pp.121-139.
7. Fredlund, D. G., H. Rahardjo, and J. Gan (1987), "Nonlinearity of strength envelope for unsaturated soils". *Proceedings of the Sixth Int. Conf. Expansive Soils (New Delhi)*, Decemder, Vol.1, pp. 49-54.
8. Fredlund, D. G., N. R. Morgenstern, and R. A. Widger (1978), "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.313-321.
9. Gan, J. M. K., D. G. Fredlund, and H. Rahardjo (1988), "Determination of the shear strength parameters of an unsturated soil using the direct shear test," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, pp.500-510.
10. Jennings, J. E., and L. B. Burland (1962), "Limitations to the use

- of effective stresses in partly saturated soils”, *Geotechnique*, Vol.12, No.2, pp.125-144.
11. Krahn J., D. G. Fredlund, and M. J. Klassen (1989), “effect of Soil Suction on Slope Stability at Notch Hill,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.26, No.2, pp.269-278.
  12. Miao, L, S. Lui, and Y. Lai (2002), “Research of soil-water characteristics and shear strength feature of Nanyang expansive soil”, *Engineering Geology*, Vol.65, Issue 4, pp.261-267.
  13. Oberg A-L. and G. Sallfors (1997), “Determination of Shear Strength Parameters of Unsaturated Silts and Sands Based on the Water Retention Curve”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.20, No.1, March 1997, pp.40-48.
  14. Toll, D. G. (2000), “The Influence of Fabric on the Shear Behaviour of Unsaturated Compacted Soils”, *Geotechnical special publication* No.99 ASCE, pp.222-234.
  15. Vanapalli, S. K., D. G. Fredlund, D. E. Pufahl, and A. W. Clifton (1996), “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.379-392.
  16. Wheeler, S. J., (1988), “A conceptual model for soils containing large gas bubbles”, *Geotechnique*, 38(3), pp.389-397.
  17. Wheeler, S. J. and Siva Kumar (1992), “Development and application of a critical state model for unsaturated soil”, *Proceedings, Wroth Memorial Symposium on Predictive Soil Mechanics*, Oxford.

(접수일자 2007. 3. 8, 심사완료일 2007. 10. 16)