

# 다짐된 불포화 실트질 모래의 흡수응력과 일축압축강도

## Suction Stress and Unconfined Compressive Strength of Compacted Unsaturated Silty Sand

박 성 완<sup>1</sup> Park, Seong-Wan

권 홍 기<sup>2</sup> Kwon, Hong-Ki

### Abstract

In order to evaluate the effect of matric suction on the strength and deformation characteristics, the unsaturated unconfined compression test is performed for the statically compacted silty sand. Specimens used were made under conditions with various initial degrees of saturation. The initial matric suction, matric suction at the peak shear strength and the volumetric deformation during the shear process were measured. From these results, it was found that the initial degree of saturation exerts the influence on the behaviors of suction, peak shear strength and the volumetric deformation. Furthermore, the suction stress( $P_s$ ) which means the apparent cohesion due to matric suction in the unsaturated shear strength could be derived.

### 요 지

본 연구에서는 정적 다짐된 자연 상태 실트질 모래의 불포화 흡수력의 영향과 변형특성을 평가하기 위해서 불포화 일축압축시험을 수행하였다. 공시체는 초기포화도를 다르게 하여 제작되었고 공시체의 초기 흡수력 및 최대일축압축강도에서의 흡수력 그리고 전단시의 체적변형이 측정되었다. 시험결과, 초기포화도의 크기에 따라 흡수력, 최대 일축압축강도 및 체적변형 거동을 살펴보고 평가할 수 있었다. 또한, 불포화상태 실트질 모래의 전단강도에서 흡수력에 의해 증가하는 겉보기 점착력을 나타내는 흡수응력( $P_s$ )을 추정하였다.

**Keywords :** Compacted silty sand, Suction stress, Unconfined compression test, Unsaturated shear strength

### 1. 서 론

현재까지 불포화토 전단강도 거동에 관한 연구는 불포화토 삼축시험이 주류를 이루어 실행되어 왔다(Fredlund and Rahardjo 1993; Sheng et al. 2011). 그러나 포화상태 시 시험에 비하여 방법의 복잡성과 간극공기압에 의해 공시체를 불포화 상태로 만드는데 소요되는 시간으로 인하여 현장에서의 적용은 특별할 수 밖에 없다. 또한 이러한 복잡성을 효율화 하기 위하여 실내시험을 바탕으로

한 불포화 전단강도에 대한 추정식이 적용되어 오고 있다(Vanapalli et al. 1996).

본 논문에서는 이에 대한 대안으로 불포화토 일축압축시험을 적용해 보았다. 일반적으로 일축압축시험은 비구속압 상태에서 축압을 가하여 그에 따른 일축강도를 측정하는 시험이다. Fredlund(1993)는 일축압축시험을 통하여 불포화토의 비배수전단강도를 평가하였고 이후 주로 일본에서 불포화토의 흡수력과 비배수 전단강도의 관계를 평가하기 위하여 일축압축시험을 수행

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (Associate professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., spark@dankook.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

한 바 있다(Nishimura & Fredlund 2000; Kato et al. 2001; Chae et al. 2010).

한편 일축압축시험의 결과의 해석에서는 구속압이 없는 상태로 Mohr 응력원에 의한 내부마찰각을 구할 수 없는 단점이 있다. 반면 실험이 비구속압 상태에서 이루어지는 관계로 얇은 사면이나 제방, 그리고 굴착벽면 등 구속압이 상대적으로 낮은 상태에서의 강도를 추정하는데 활용될 수 있다. 또한 불포화 상태 일축압축시험은 강도를 효과적인 시간에 획득할 수 있는 장점도 있어 현장 적용을 위한 부분적인 시험방법으로의 가능성이 크다고 판단된다.

따라서, 본 논문에서는 관련분야 기초연구의 일환으로 수정된 불포화 일축압축시험기를 이용하여 다짐된 상태의 실트질 모래의 초기상태 포화도에 따른 불포화 전단강도특성을 살펴보았다. 아울러 함수특성곡선과 측정된 흡수력을 이용하여 흡수응력( $P_s$ )을 추정하고, 이를 실험결과와 비교 및 평가하였다.

## 2. 불포화 전단강도 및 흡수응력의 정의

### 2.1 불포화 전단강도

1930년대부터 Terzaghi에 의해 포화토의 유효응력에 관한 이론이 정립된 이래 불포화토 전단강도에 관한 여러 연구들이 진행되어 왔다. Bishop(1959)은 기존의 포화상태 이론을 근거로 불포화토에 관한 유효응력 개념을 제한하였는데 식 (1)과 같다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma'$ : 유효응력,  $\sigma$ : 전응력,  $\chi$ : 유효응력계수, 0~1사이의 값을 가진다. (0: 완전건조, 1: 완전포화),  $u_a$ : 간극공기압,  $u_w$ : 간극수압.

그 후, Bishop과 Blight(1963)는 두 가지 독립상태변수인  $(\sigma - u_a)$ 과  $(u_a - u_w)$ 을 사용하여  $\chi$  값을 추정할 수 있다고 보고하였다. 또한 Fredlund와 Morgenstern(1977)의 연구는 이러한 두 독립변수를 활용하여 불포화토의 응력상태를 적절하게 표현할 수 있음을 보였다. Fredlund와 Morgnstern(1978)은 Mohr-Coulomb 파괴기준을 기준으로 두 가지 독립상태변수를 사용하여 식 (2)와 같은

불포화 전단강도 식을 제안하였다. 이들은 또한 흡수력의 증가에 따라 불포화 전단강도가 비선형적으로 증가하고 있다는 실험적 결과를 보여주고 있다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

여기서,  $\tau$ : 전단응력,  $c'$ : 유효점착력,  $\phi'$ : 유효마찰각,  $\phi^b$ : 흡수력 변화에 따른 전단강도의 변화를 나타내는 각도.

이후, 불포화토 전단강도의 정확한 추정을 위한 여러 제안식들이 보고되어 왔으며, 이들의 대부분은 Mohr-Coulomb 파괴기준을 근거로 흡수력의 증가에 따른 겉보기 점착력 항을 어떻게 추정하는지에 대해 공통적으로 연구되어 왔다(Fredlund and Rahardjo 1993; Karube et al. 1996; Vanapalli et al. 1996; Kohgo et al. 2003; Lu and Likos 2006)

### 2.2 흡수응력

지반내 함수량과 흡수력의 관계는 평형 상태에 있어 함수특성곡선으로서 알려져 있다. 건조 과정과 습윤 과정에서의 함수특성의 차이는 이력으로 불린다. 따라서, 동일한 흡수력에서 건조와 습윤 경로에 따라 동일하지 않은 간극수가 존재하게 된다. 간극수의 상태가 다르면, 결과적으로 간극수의 분포가 다르게 된다. 그림 1은 Karube와 Kato(1996)에 의해서 제안된 Bulk water와 Meniscus water의 개념도를 나타내고 있다. 벌크수는 흡입자의 간극을 차지하고 있는 간극수로, 메니스커스수는 흡입자의 접점에 존재하는 간극수를 의미한다. 벌크수는 포화도가 높아지면 간극을 차지하는 비율이 높아지며, 반대로 포화도의 저하와 함께 메니스커스수의 비율이 증가하게 되는 개념이다. 따라서, 이 두 가지의 간극수의 분포와 형태에 의하여 흡수력이 불포화토의 역

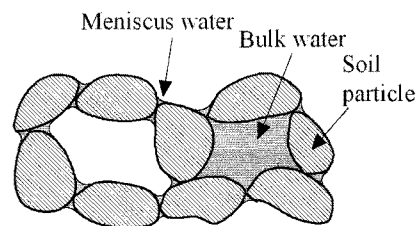


그림 1. 벌크수와 메니스커스수의 개념도

학 거동에게 미치는 영향은 변화하게 된다.

메니스커스수에 의해 발생하는 흡수력은 내부 입자간력을 증가시키고 그것에 따라 흙 입자들의 강성을 증가시킨다. 한편, 벌크수에 의해 발생하는 흡수력은 흙 입자들의 강성을 증가시키고, 동시에 음의 간극수압과 같은 작용에 의해서 흙 입자들을 압축해 체적을 감소시킨다. 이러한 영향은 음의 간극수압 영향과 같은 것이다.

Karube et al.(1996)는 메니스커스 수분의 영향으로 발생하는 응력 성분을 메니스커스 응력( $P_m$ ), 벌크 수분의 영향으로 발생하는 응력 성분을 벌크 응력( $P_b$ )으로 구분하여 정의하였다. 또한, 두 개의 응력 성분의 차이가 흡수응력(suction stress,  $P_s$ )을 구성한다고 제안하였는데 이는 식 (3)과 같다.

$$P_s = P_m + P_b = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot (u_a - u_w) \quad (3)$$

여기서,  $S_r$ : 포화도,  $S_{r0}$ : 잔류포화도.

한편 Lu와 Likos(2006)가 함수특성곡선에 기반하여 유사한 의미의 흡수응력을 추정하도록 제안한 연구와 최근의 풍화토 대상 국내연구(오세봉 등 2011)에서도 기존의 Karube et al.(1996) 연구와 크게 차이가 없음을 알 수 있다.

### 3. 불포화 일축압축시험

#### 3.1 사용된 시료

본 시험에서는 경상북도 성주군의 자연 상태 실트질 모래를 사용하였다. 시료는 200번체 통과량이 30% 정도로 통일분류법으로 SM이며 액성지수(LL)는 37.7%, 소성지수(PL)는 32.6% 그리고 입자 밀도( $\rho_s$ )는 2.534이다. 또한, 다짐시험으로부터 최적함수비는 24.8%이다. 대체적으로 낮은 소성지수 5.1%를 가지고 있어 일정 다짐상태가 아니면 느슨한 상태를 유지하는 특성을 가지고 있다. 기본물성은 표 1에 정리되어있다. 한편, 실트질 모래의

표 1. Silty sand의 기본물성

No.200체 통과량	LL	PL	$\rho_s$	OMC	USCS
30.7%	37.7%	32.6%	2.534	24.8%	SM

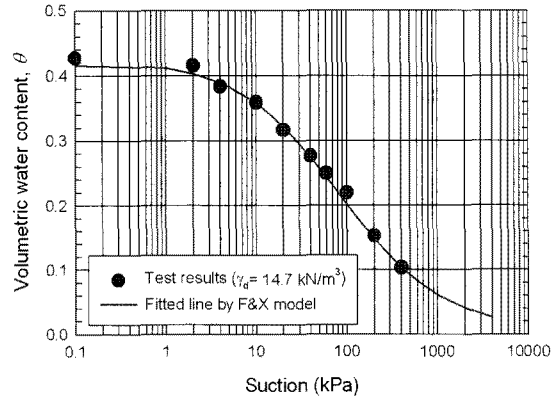


그림 2. 실트질 모래의 함수특성곡선 ( $\gamma_d = 14.7 \text{ kN/m}^3$ )

표 2. SWCC 시험을 통한 비선형계수

a	n	m
75.8	0.74	2.3

불포화 특성을 알아보기 위해 건조단위중량은  $14.7 \text{ kN/m}^3$ 의 조건으로 함수특성 시험을 실시하였고 결과는 그림 2와 같다.

흡수력에 따른 시료의 함수특성을 나타내기 위하여 63.5mm의 직경과 32mm의 높이의 시료를 이용하여 포화 후 건조경로로 구하였다. 시험결과를 토대로 식 (4)와 같이 Fredlund & Xing(1994)이 제안한 3계수 비선형 모델로 적용하였다.

$$\theta = C(\psi) \left\{ \frac{\theta_s}{\ln[e + \psi/a]^n} \right\}^m \quad (4)$$

여기서,  $\theta$ 는 체적함수비,  $\theta_s$ 는 포화시의 체적함수비,  $a$ 는 공기함입치와 관련된 계수,  $n$ 은 함수특성곡선의 기울기와 관계하는 곡선계수,  $m$ 은 잔류함수비와 관계하는 곡선계수를 나타내며,  $C(\psi)$ 는 보정계수로써 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\psi/\psi_r)]}{\ln[1 + (10^6/\psi_r)]} \quad (5)$$

여기서,  $\psi_r$ 는 잔류체적함수비  $\theta_r$ 에 대응하는 흡수력을 의미한다. 비선형 계수  $a$ ,  $n$  그리고  $m$ 은 표 2와 같다.

#### 3.2 불포화 일축압축시험장치

본 시험에서는 불포화토 상태의 일축압축시험을 실

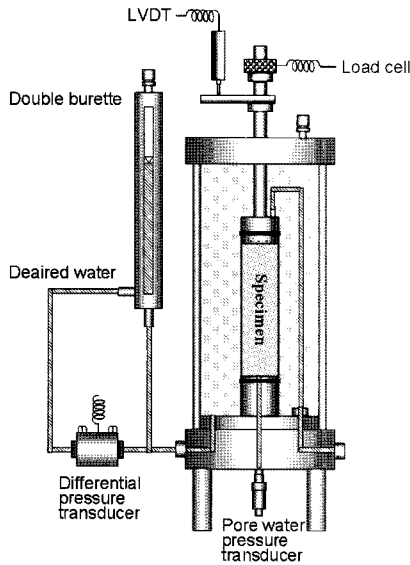


그림 3. 불포화 일축압축시험장치

시험하기 위해 기존의 일축압축시험을 수정하였다. 그림 3은 수정된 불포화도 일축압축장치를 보여주고 있다. 이 시험장치는 일정함수비 상태의 불포화 시료를 대상으로 전단시험을 할 수 있도록 제작되어 기존의 시험기와는 다르게 간극수압의 측정을 통하여 공시체의 흡수력 상태를 측정할 수 있다. 간극수압계로부터 수압의 변화는 곧 공시체의 흡수력 변화로 해석할 수 있다. 이때 사용되는 세라믹디스크는 500kPa의 공기함입치를 가지고 있으며, 완전히 포화가 완료된 후 실험을 진행한다. 공시체와 상부 캡 사이는 다공판이 설치되어 공시체의 간극공기압을 대기압 상태 공기압으로 유지할 수 있도록 해준다. 또한, 이 장치는 삼축 형태의 시험기로 셀 내부는 탈기수로 완전히 채워져 이중관 뷰렛에 연결되어 있고, 수위의 변화로부터 전단시 공시체의 부피변화를 측정할 수 있다. 여기서, 이중관 뷰렛은 대기상태와 연결되어 있어 구속압의 영향은 최소화된다. 한편, 전단시 공시체의 전단변위는 연직변위계를 사용하여 측정되며, 이 때의 일축압축강도는 셀 윗부분에 설치된 하중 센서를 통해 측정되고 있다. 따라서, 일축압축시험을 수행하는 동안, 하중, 간극수압, 변위, 그리고 이중관 뷰렛에 연결되어 있는 압력계를 통한 체적변화 값이 측정된다. 이로부터 체적변화로 인한 간극비의 변화, 포화도 그리고 흡수력의 변화를 알 수 있다.

### 3.3 시험방법

공시체는 2.0mm 체를 통과한 시료를 사용하여 건조

표 3. 각 공시체의 초기상태

No.	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	$e_i$	$S_{r,i}$ (%)	$\psi_i$ (kPa)
1	14.7	4.9	0.720	17.5	93.1
2	14.8	6.6	0.716	24.6	87.6
5	14.8	13.1	0.714	47.3	77.3
7	14.8	17.2	0.713	60.8	71.0
12	14.8	25.2	0.717	90.0	20.1

Note:  $\gamma_d$ : 공시체 건조밀도,  $w_i$ : 초기함수비,  $e_i$ : 초기간극비,  $S_{r,i}$ : 초기포화도,  $\psi_i$ : 초기흡수력

단위중량 및 함수비 범위의 다양한 초기포화도 12가지의 조건으로 제작하였다. 이는 초기포화도, 즉 초기 흡수력상태에 따른 일축압축거동을 보기 위해 인위적으로 적용되었다. 이 때 공시체 크기는 직경 50mm와 높이 100mm이며, 3층 정적 다짐으로 제작되었다. 동일한 건조단위중량에 대해 다양한 초기 포화도 조건으로 제작하기 위하여 각기 다른 정적다짐에너지를 부여하였다. 제작된 공시체는 전체적으로 일정 함수비를 유지하도록 밀봉되어 항온 및 항습상태에서 24시간 보관되었으며, 그 후 시험에 이용되었다. 각 공시체의 초기상태는 표 3과 같다.

전단과정을 실시하기 전 세라믹디스크의 표면에 수분량을 증감시켜 그에 따른 간극수압의 변화가 정상적으로 반응하는지를 체크하였다. 또한, 모든 배수라인은 공시체를 거치하기 전 완전히 포화시키는 작업이 필요하다. 공시체 거치 후 멤브레인으로 공시체를 캡부분과 고정시키며, 고무링을 이용하여 밀폐시킨다. 이 때 캡부분과 대기압 상태의 배기라인은 항상 열어둔다. 공시체의 거치가 완료되면 준비된 탈기수를 셀 내부에 급수시켜 공시체의 체적변화 측정을 위해 완전히 채우도록 한다. 마지막으로 시험은 압밀 과정은 생략되며 부피변화에 따라 간극공기의 출입만 가능한 비배수배기의 방식에서 0.1mm/min의 속도로 전단과정이 수행되었다.

### 3.4 시험결과

초기 포화도 12가지의 조건으로 제작된 공시체에 대한 일축압축시험이 실시되었고, 각 공시체의 파괴상태에서 얻어진 결과는 표 4와 같다. 그림 4는 축변형률과 일축압축강도의 관계를 보이고 있으며, 초기 포화도에 관계없이 최대 강도 및 잔류상태가 확연한 취성 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 약 5% 정도의 축변형률에서 잔류상태를 보이고 있다. 그림 5는 축변형률과

표 4. 각 공시체의 초기상태

No.	$q_u$ (kPa)	$E_{50}$ (Mpa)	$e_f$	$S_{r,f}$ (%)	$\psi_f$ (kPa)	$P_{s,f}$ (kPa)
1	171.2	19.9	0.728	17.7	96.1	17.0
2	180.5	23.1	0.723	24.8	87.5	21.8
3	262.2	29.8	0.717	33.5	82.6	27.6
4	218.0	21.8	0.720	40.3	85.2	34.4
5	189.5	18.2	0.718	47.2	82.6	39.0
6	173.7	16.1	0.717	53.4	78.0	41.7
7	138.5	11.9	0.715	60.2	73.8	44.4
8	123.7	10.1	0.721	66.8	67.5	45.1
9	114.3	7.5	0.732	70.0	56.8	39.8
10	101.3	5.8	0.716	81.8	30.2	24.7
11	80.5	3.3	0.728	89.0	19.3	17.2
12	79.4	3.4	0.724	89.3	18.1	16.2

Note:  $q_u$ : 최대압축강도,  $E_{50}$ : 변형계수,  $e_f$ : 파괴시 간극비,  $S_{r,f}$ : 파괴시 포화도,  $\psi_f$ : 파괴시 흡수력,  $P_{s,f}$ : 파괴시 흡수응력

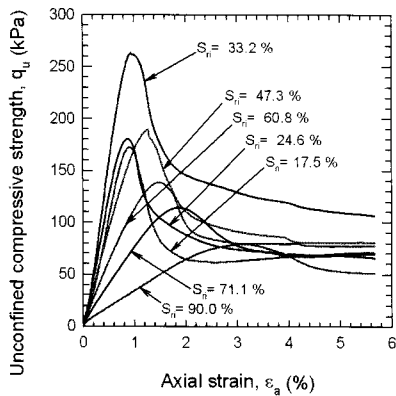


그림 4. 축변형률에 따른 일축압축강도의 변화

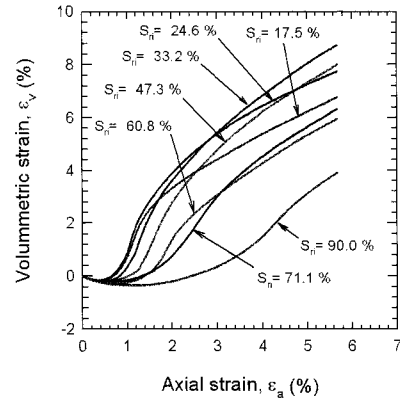


그림 5. 축변형률에 따른 체적변화

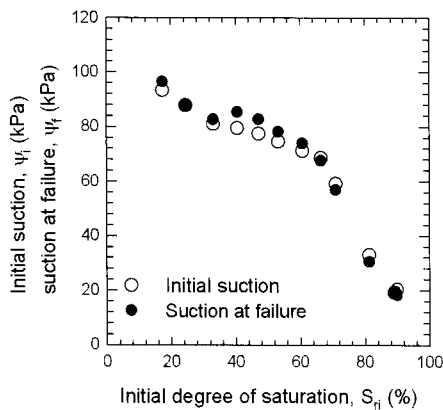


그림 6. 초기포화도에 따른 초기흡수력과 파괴시 흡수력의 변화

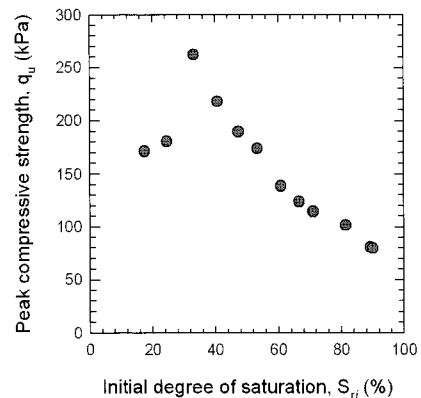


그림 7. 초기포화도에 따른 최대일축압축강도

체적변화의 관계를 비교하고 있으며, 이로부터 전단초기 압축거동을 보이다가 급격히 팽창하는 것을 관찰할 수 있다. 그림 6과 같이 초기포화도가 높을수록 흡수력 값이 작아지고 있으며, 팽창량 또한 감소함을 그림 5로부터 확인할 수 있다. 또한, 전단과정에서 초기에 측정

된 공시체의 흡수력과 파괴시 측정된 흡수력의 차이가 초기포화도 30~50% 사이를 제외하고 거의 변화가 없음을 알 수 있는데 큰 압축강도를 받는 공시체에서는 내부입자간력이 증가하게 되어 흡수력의 증가폭이 커진다고 판단된다. 그림 7의 초기 포화도와 최대일축압축강도와

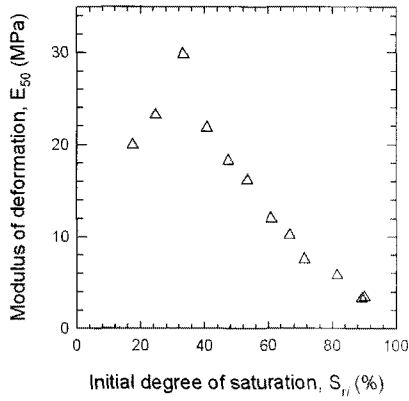


그림 8. 초기포화도에 따른 변형계수의 변화

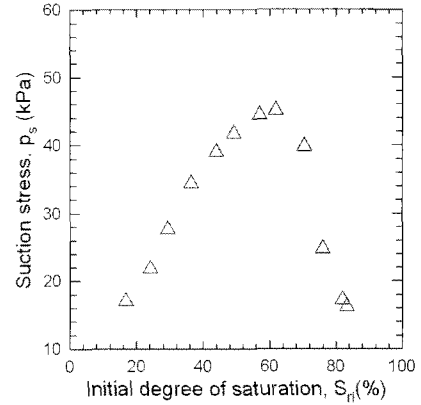


그림 9. 초기포화도에 따른 흡수응력의 변화

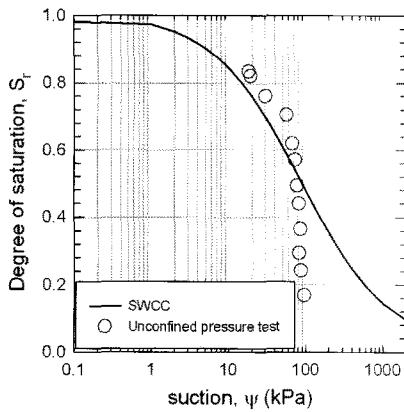


그림 10. 흡수력과 포화도의 관계

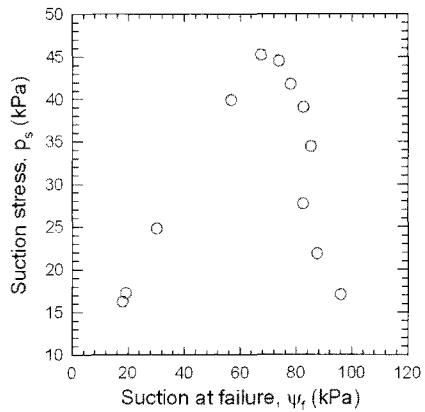


그림 11. 흡수력에 따른 흡수응력의 변화

의 결과에서 처럼 초기포화도가 작아질수록 커지는 것이 아니라, 약 30%정도에서 가장 큰 압축강도를 보이고 있다. 결국 이보다 더 건조하거나 습윤할 때 상대적으로 압축강도가 작아진다는 것을 알 수 있다. 이는 초기포화도 30% 근처에서 파괴시 측정된 흡수력의 변화가 가장 큰 구간이고, 이 때의 흡수력의 상태가 실트질 모래의 강도 증가에 큰 영향을 미치고 있다고 판단된다.

그림 8은 초기포화도에 따른 변형계수의 변화를 보이고 있다. 변형계수의 경향은 최대압축강도의 분포와 유사하여 불포화도 강도와 강성도의 변화가 비슷함을 알 수 있다. 그림 9는 초기 포화도에 따른 흡수응력과 관계의 그래프이다. 흡수응력은 식 (3)을 사용하여 추정하였다. 포화도가 증가함에 따라 흡수응력이 증가하나 포화도 65% 이후부터 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 Lu와 Likos(2006)의 논문에서 언급된 조립토에 대한 흡수응력의 경향을 나타내어 본 연구의 결과가 포화도의 함수로 잘 표현됨을 보여주고 있다고 판단된다. 다만 그림 7에서 포화도가 약 30%일 때 최대압축강도가 얻어진 결과에 대한 부분과 최대흡수응력이 얻어진 결과

의 차이는 변형률이 상대적으로 큰 일축시험의 경우 흡수력, 시료내부의 함수 이동, 흙 내부 마찰각 및 여러 요인들에 의하여 차이가 발생할 수 있다고 판단된다.

그림 10은 불포화 함수특성곡선과 일축압축시험의 초기 포화도에 따른 흡수력의 변화를 비교하여 나타내고 있다. 포화도가 클수록 함수특성곡선과 유사한 거동을 보이고 있으나, 약 60% 포화도를 기점으로 그 이하에서는 흡수력이 도달하지 못함을 알 수 있다. 이는 일축압축시험 시 일정포화도로 맞추어 제작된 공시체로 인하여 낮은 포화도에서 차이가 발생한다고 판단된다. 또한 그림 11에서는 파괴시 흡수력에 대한 불포화 흡수응력의 변화를 보여주고 있다. 대상 시료의 경우 70kPa 흡수력에 45kPa의 최대 흡수응력을 보여주고 있는데 이는 Lu와 Likos(2006)의 연구에서 언급된 비와 같이 모래 계열 흙의 경우 흡수력에 따른 흡수응력의 관계에서 흡수응력이 증가하다가 일정 흡수력에 도달 이후에는 감소함을 보이는 경향을 보이는데 본 불포화 일축시험의 결과들도 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 수정한 불포화 일축압축장치를 활용하여 다짐상태 실트질 모래에 대한 불포화 전단강도 및 변형 거동의 특성에 대해 살펴 보았다. 현재까지 본 연구를 통하여 획득된 결과를 토대로 종합해 보면 다음과 같다.

- (1) 불포화 공시체의 초기포화도 조건에 따라 일정 초기 포화도, 약 30%를 기준으로 강도의 증감이 나타났는데 이는 흡수력 및 간극수 상태에 의해 기반재료 내부에서 발생하는 응력의 차이로 인하여 최대 강도가 발현되는 것으로 판단된다. 또한, 강성도, 즉 변형 계수 역시 이와 관련되어 있는 것으로 판단된다.
- (2) 전단과정시 초기 압축 후, 팽창거동을 보이고 있으며, 초기포화도 30~50% 사이를 제외하고 측정된 흡수력의 값이 변화가 크지 않음을 알 수 있다.
- (3) 초기포화도 조건에 따른 파괴시 흡수응력은 낮은 포화도에서 증가를 하다 일정 포화도를 기점으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 초기포화도가 약 30%일 때 최대일축압축강도가 얻어진 결과와 다소 차이가 있는데, 이는 변형률이 상대적으로 큰 실험의 경우 흡수력, 함수의 이동, 흙 내부 마찰각 및 여러 요인들에 의하여 차이가 발생할 수 있다고 판단된다.
- (4) 파괴시의 흡수력에 따른 흡수응력의 변화는 일정 흡수력에서 최대흡수응력을 발휘하고 그 기점을 전후로 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다.
- (5) 현재까지 구속압이 없는 상태에서의 기초적인 연구가 진행되었으나, 향후 다양한 조건의 밀도와 구속압 조건에 대한 시험을 통하여 보다 정량화된 불포화 전단강도특성을 평가할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0016050). 연구지원에 깊은 감사를 드리며 연구수행에 도움을 준 단국대학교 석사과정 태두형 군에게 감사의 말을 전합니다.

## 참 고 문 헌

1. 오세봉, Ning Lu, 송하동 (2011), “다짐 풍화토의 Ko 압축 삼축 시험에서 나타난 파괴이전 흡수응력 특성곡선”, 한국지반공학회 논문집, 제27권, 제1호, pp.41-52.
2. Bishop, A.W. (1959), “The Principle of Effective Stress”, *Tecnisk Ukeblad*, 39:859-863.
3. Bishop, A. W. and Blight G. E. (1963), “Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partially Saturated Soils”, *Geotechnique*, Vol.13, pp.177-197.
4. Chae, J.G., Kim, B.S, Park, S.W., and Kato, S. (2010), “Effect of suction on unconfined compressive strength in partly saturated soils”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(3):281-290, Doi: 10.1007/s12205-010-0281-7.
5. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), “Stress State Variables for Unsaturated Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.103, pp.447-466.
6. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978), “The Shear Strength of Unsaturated Soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.3, pp.313-321.
7. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & sons, New York.
8. Karube, D. and Kato, S. (1996), “An Ideal Unsaturated Soil and the Bishop’s Soil. Proceeding of 13th International Conference”, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, Vol.1, pp.43-46.
9. Karube, D., Kato, S., Hamada, K., and Honda, M. (1996), “The Relationship between the Mechanical Behavior and the State of Pore-water in Unsaturated Soil”, *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.535, No.III-34, pp.83-92.
10. Kato, S., Yoshimura, Y., Kawai, K., and Sunden, W. (2001), “Effects of suction on strength characteristics of unconfined compression test for a compacted silty clay”, *Geotechnical Engineering Journal, JSCE*, 687:213-218.
11. Kohgo, Y., Nakano, M., and Miyazaki, T. (1993), “Theoretical Aspects of Constitutive Modeling for Unsaturated soils”, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63.
12. Lu, N. and Likos, W. L. (2006), “Suction Stress Characteristics Curve for Unsaturated Soil”, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
13. Nishimura, T. and Fredlund, D. G. (2000), “Unconfined Compressive Strength of a Silty Soil and Kaolin Below the Residual State”, *Advances in Unsaturated Geotechnics, GSP No.99, ASCE*, pp.262-274.
14. Sheng, D., Zhou, A., and Fredlund, D. G. (2011), “Shear Strength Criteria for Unsaturated Soils”, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.29, No.2, pp.145-159.
15. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996), “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp.379-392.

(접수일자 2011. 1. 17, 심사완료일 2011. 8. 5)