

## 낙동강 실트질 모래의 불포화 전단강도특성

### Unsaturated shear strength characteristics of Nak-dong River silty-sand

차봉근<sup>1)</sup>, Bong-Geun Cha, 김영수<sup>2)</sup>, Young-Su Kim, 박성식<sup>3)</sup>, Sung-Sik Park, 신지섭<sup>4)</sup>, Ji-Seop Shin

<sup>1)</sup>경북대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engin., Kyungpook National University

<sup>2)</sup>경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engin., Kyungpook National University

<sup>3)</sup>경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engin., Kyungpook National University

<sup>4)</sup>경북대학교 토목공학과 박사과정, Doctor Course, Dept. of Civil Engin., Kyungpook National University

**SYNOPSIS** : The natural soils are classified in saturated soils and unsaturated soils according to level of ground water but the research for only saturated soils has been conducted by this time. However, there are many problems which are not solved by using the concept and principle of saturated soils on the natural soils. In fact, it is known that unsaturated soils represent the behavior characteristic unlike completely saturated soils because of the adhesion under the influence of negative pore water pressure, the high angle of friction and the low water permeability by the air entry. So it needs to conduct the various researches on insufficient unsaturated soils. In this paper, unsaturated triaxial compressive tests are conducted in order to do research on shear strength characteristic on sands and silty sands of Nakdong river. As a result of the tests, the cohesion is increased in non-linear type according to the change of the matric suction, but the angle of internal friction is not changed much.

**Keywords** : unsaturated soils, shear strength characteristic, matric suction

## 1 서론

일반적으로 지금까지 연구된 토질역학은 ‘포화토 측면에서 구조물을 설계하는 것이 안전하다.’ 라는 생각과 불포화토를 연구하기 위해 소요되는 비용과 시간 등의 어려움으로 인하여 포화토에 대한 연구가 대부분이었다. 현재까지의 연구동향을 살펴보면 불포화토는 부간극수압의 영향으로 겉보기점착력을 보임과 동시에 마찰각도 커지며 흐름에 있어서는 간극 속에 공기의 함입으로 투수성이 저하하는 등 완전 포화토와는 다른 거동특성을 나타내는 것으로 알려지고 있으며, 이러한 불포화토만의 거동특성은 포화토 거동특성에 비해 이해하기 어렵고 복잡하여 연구 결과 역시 미진한 상태이다. 이러한 어려움에도 불구하고 불포화토를 연구해야 하는 이유는 지반을 굴착하거나 채성형하고 다짐하는 등의 지반관련 토목공사나 댐과 교량기초 등의 지반구조물 시공은 대부분 불포화지반 위에서 행해지기 때문이다.

국내에서도 불포화 영역에 대한 이해와 중요성이 점차 증가하고 있다. 문준배(1993)는 불포화토내에서 발휘되는 부간극수압을 측정할 수 있는 팁을 개발하였고 송창섭(1994)은 불포화토의 거동 예측을 위한 구성식을 개발하여 실험값을 잘 추정할 수 있음을 보였다. 김찬기(2003)는 풍화 화강토의 일정 간극비에 서 초기함수비의 변화에 따른 강도 및 변형특성을 밝히기 위해 불포화 삼축압축시험을 실시하였다. 이 밖에 이성진, 이승래, 장범수(2002)등이 화강 풍화토에 대해, 정상섭(2004)이 점토함유량에 따른 화강 풍화토에 대해, 임성운(2007)이 사질토에 대해 불포화 전단특성에 관한 연구가 진행되었다. 하지만 불포화토에 관한 연구는 국외에 비해서는 아직 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 낙동강유역의 모래와 실트를 대상으로 불포화 삼축압축실험을 통해 불포화토의 강도특성을 규명하는 것을 목적으로 하였다. 낙동강 유역의 모래와 실트를 이용하여 다양한 모래지반을 구성하고 다양한 흡인력상태에서 점착력과 내부마찰각의 변화를 확인하고자 하였다.

## 2. 사용시료

### 2.1 기본 물성치

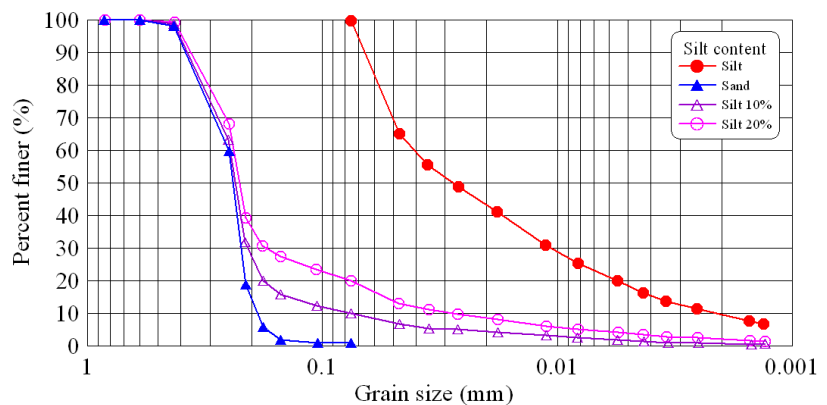
본 연구에서는 낙동강 중류 지역의 모래를 채취한 후 깨끗한 모래에 대한 시험을 위하여 #20체~#200체 사이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 Clean sand로 만들어 실험에 사용하였다. 실트의 경우도 낙동강 중류 지역에서 채취한 후 깨끗한 물에 씻어 #200체 위의 시료를 제거한 뒤 남은 시료를 자연 건조시켜 사용하였다. 시료준비 후 실트함유율의 변화에 따른 실트질 모래의 불포화전단거동을 연구하기 위하여 모래와 실트를 섞어 실트질 모래를 인위적으로 구성할 때 상대밀도 80%에 조밀한 시료로 구성하였다. 시료에 대한 기본 물성치는 표 1, 2와 같고 각 시료에 대한 입도는 그림 1에 나타내었다.(김영수, 김대만, 2008)

표 1 낙동강 실트질 모래의 물성치

Index properties	Silt contents		
	0%	10%	20%
Specific gravity	2.637	2.640	2.638
$e_{max}$	1.181	1.226	1.293
$e_{min}$	0.849	0.642	0.596
e	0.919	0.759	0.742
$D_r$	80%	80%	80%
$\gamma_d$	1.384	1.510	1.524
$D_{10}(mm)$	0.19	0.08	0.02
$D_{30}(mm)$	0.22	0.22	0.20
$D_{60}(mm)$	0.25	0.24	0.24
$C_u$	1.316	3.038	10.435
$C_z$	1.038	2.445	7.246
USCS	SP	SP	SM

표 2 낙동강 실트의 물성치

Specific gravity	2.640
Liquid limit(%)	34
Plastic limit(%)	26
Plastic index(%)	8
Pass #4, (%)	100
Pass #200, (%)	100
USCS	ML



## 2.2 함수특성곡선 (SWCC : Soil Water Characteristic Curve)

낙동강 실트질 모래의 함수특성곡선을 구하기 위해서 압력판 추출실험과 데시케이터실험을 함께 실시하였다. 0~200kPa 사이의 흡수력 범위에서는 텀피셀을 사용하였고, 물리적으로 적용하기 불가능한 그 이상의 범위에 대해서는 데시케이터 실험을 이용하여 삼투흡입력을 적용하였다. 그림 2는 본 논문에 적용된 함수특성곡선을 나타낸 것이다.

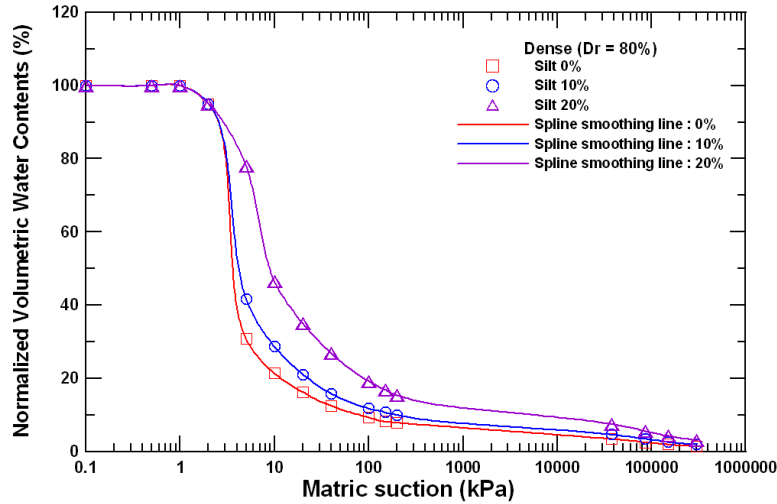


그림 2 함수특성곡선(SWCC)

## 3. 불포화 전단강도특성 시험

### 3.1 성형방법

본 논문에서 실시된 시험의 모든 시료성형방법은 습윤다짐법에 의하여 성형되었다. 습윤다짐법은 시료에 물을 첨가하여 겔보기 점착력을 증가시켜 다지므로 시료가 자립이 되도록 성형할 수 있다. 또한, 입자 크기의 차이가 큰 경우 다지기 전 미리 물을 첨가하여 시료를 섞기 때문에 입자 분포가 균질한 시료를 만들 수 있다. 습윤다짐법은 시료를 다질 때 각 층의 높이를 일정하게 되도록 다짐한 후, 다음 층을 성형한다.

그러나 이러한 방식으로 성형할 경우, 시료의 하층부로 갈수록 밀도가 커지는 경향이 있으므로, 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 단위중량을 목표로 5층의 과소다짐법을 적용하였다. 과소다짐법은 각 층에 대해 동일한 시료무게를 서로 다른 다짐높이로 성형하여 시료 전체에 균일한 건조단위중량을 확보하는 시료성형방법이다.(Ni, 1987)

### 3.2 전단강도특성 실험장치

불포화토의 강도특성을 알기위해 일반삼축실험기를 불포화토의 실험에 알맞도록 개량 제작하였다. 본 연구에서 이용된 삼축압축실험장비는 그림 3과 같으며 System의 구성은 Chamber cell과 가압장치로 Load Track, Flow Track(I), Flow Track(II), Air compressor등이 있으며 측정장치 및 제어장치로 Micro computer system등으로 구성되어 있다.

Chamber cell은 시료에 모관흡인력을 재현시키기 위하여 공기압과 수압을 시료의 상부 및 하부 pedestal을 통하여 가하였으며, 물을 통과시키고 공기의 이동을 제한하기 위하여 Chamber cell의 하부 pedestal에 500kPa의 높은 공기유입치를 갖는 Ceramic disk를 설치하였다.

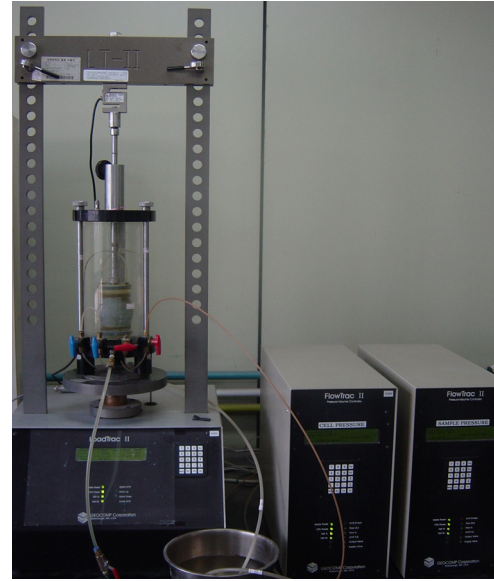
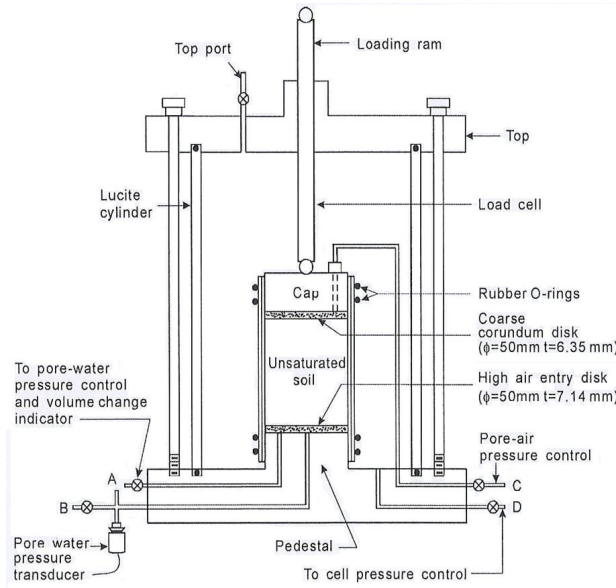


그림 3 Ceramic disk가 설치된 Chamber cell의 모식도와 사진

### 3.3 전단강도특성 실험방법

불포화토의 강도특성을 나타내는 강도정수는 Fredlund et al.,(1978)가 발표한 전단강도식을 통해  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi^b$ 로 정의되며 이 중  $\phi^b$ 를 얻기 위해서는 개량된 삼축압축실험기를 이용하여 얻을 수 있다. 이 식은 Mohr-coulomb의 파괴규준을 불포화토에 적용할 수 있도록 확장하여 Mohr-coulomb의 파괴규준에 흡인력을 고려할 수 있도록 축을 추가하여 흡인력에 따른 전단강도의 증가량을  $\phi^b$ 의 값으로 고려할 수 있도록 하였다. 이때  $\phi^b$ 는 흡인력의 증가에 따라 일정한 값을 가지는 것으로 고려하였다. 불포화토의 거동특성을 규명하기 위해 수행되는 실험 중 가장 일반적인 것이 삼축압축실험이며 불포화토에 대한 여러 가지 실험의 종류 중 본 논문에서는 비배기-비배수 상태에서 시행하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_3 - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (1)$$

여기서,  $c'$  = 유효 점착력

$u_a$  = 간극 공기압

$u_w$  = 간극 수압

$(\sigma_3 - u_a)$  = 순연직 응력

$(u_a - u_w)$  = 모관흡인력

$\phi'$  = 유효마찰각

$\phi^b$  = 모관흡인력  $(u_a - u_w)$ 의 증가에 따른 겉보기 점착력의 증가를 표현하는 유효마찰각

시료를 습윤다짐법에 의하여 성형하고 시료가 제작되면 Chamber Cell의 밑판에 안치한 후 멤브레인을 씌운다. 이후 시료의 상단에는 캡이 연결되고 캡으로는 공기압이 연결된다. Chamber Cell에 시료가 준비되면 시료의 밑판을 통하여 증류수를 가하여 시료를 포화시킨다. 포화도는 B-value를 측정하여 포

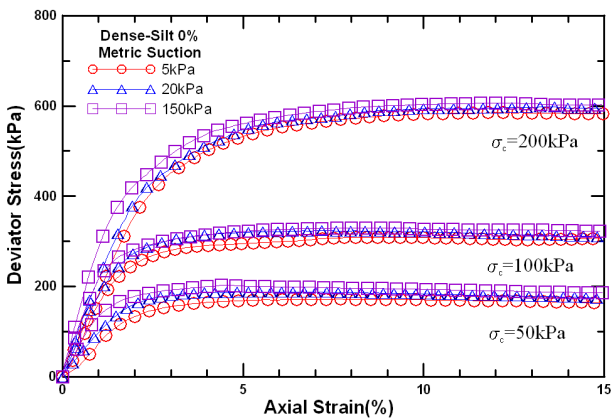
화도가 95%가 되면 완전포화가 되었다고 판단하였다. 시료가 포화에 이르면 Chamber Cell에 정해진 응력조건으로 압력을 가하여 주어진 구속압( $\sigma_3 - u_a$ )과 흡인력( $u_a - u_w$ )의 상태로 압밀시킨다. 압밀이 완료되면 전단실험을 수행한다.

#### 4. 실험결과

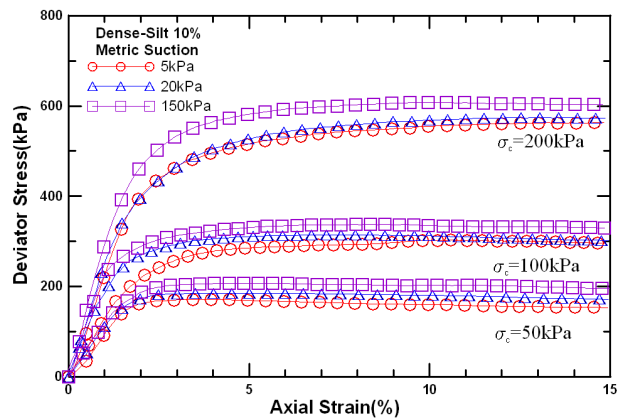
일반 삼축압축시험기에 500kPa의 Ceramic disk를 사용하여 개량여 낙동강 유역의 실트질 모래지반의 강도특성을 확인하기 위해 불포화 삼축압축시험을 시행하였다. 실험조건은 각각 실트함유율 0%, 10%, 20%, 구속압 50, 100, 200kPa, 흡인력 5, 20, 150kPa 으로 달리 가하여 비배기-비배수 상태에서 전단시험을 실시하고 전단 시 압축변형률 속도는 0.01%/min으로 하였다. 표 3에 실험조건과 결과를 정리하였다.

##### 4.1 응력-변형률

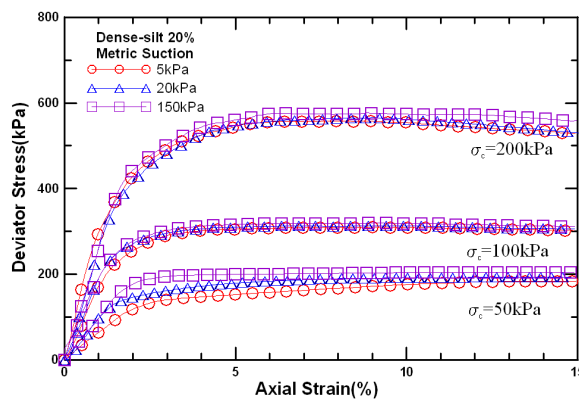
낙동강 실트질 모래의 불포화 전단 시 응력 및 변형률에 대한 거동특성을 밝히기 위해 비배기-비배수 삼축압축시험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다. 그림 4에는 실트함유율에 따라 흡인력 5, 20, 150kPa 과 구속압 50, 100, 200kPa일 때의 축차응력과 변형률의 관계를 나타낸 것이다.



(a) Dense-Silt 0%



(b) Dense-Silt 10%



(c) Dense-Silt 20%

그림 4 축차응력-변형률의 관계

## 4.2 확장된 Mohr-coulomb의 파괴규준

낙동강 실트질 모래의 불포화 진단 시 실트함유율과 흡인력에 따라 점착력과 내부마찰각이 어떻게 변하는지 알아보기 위해 확장된 Mohr-coulomb의 파괴규준으로 확인해 보았다. 그림 5에서는 Mohr-coulomb의 파괴규준을 불포화토에 적용할 수 있도록 흡인력을 고려한 축을 추가하여 점착력과 내부마찰각을 구하였다.

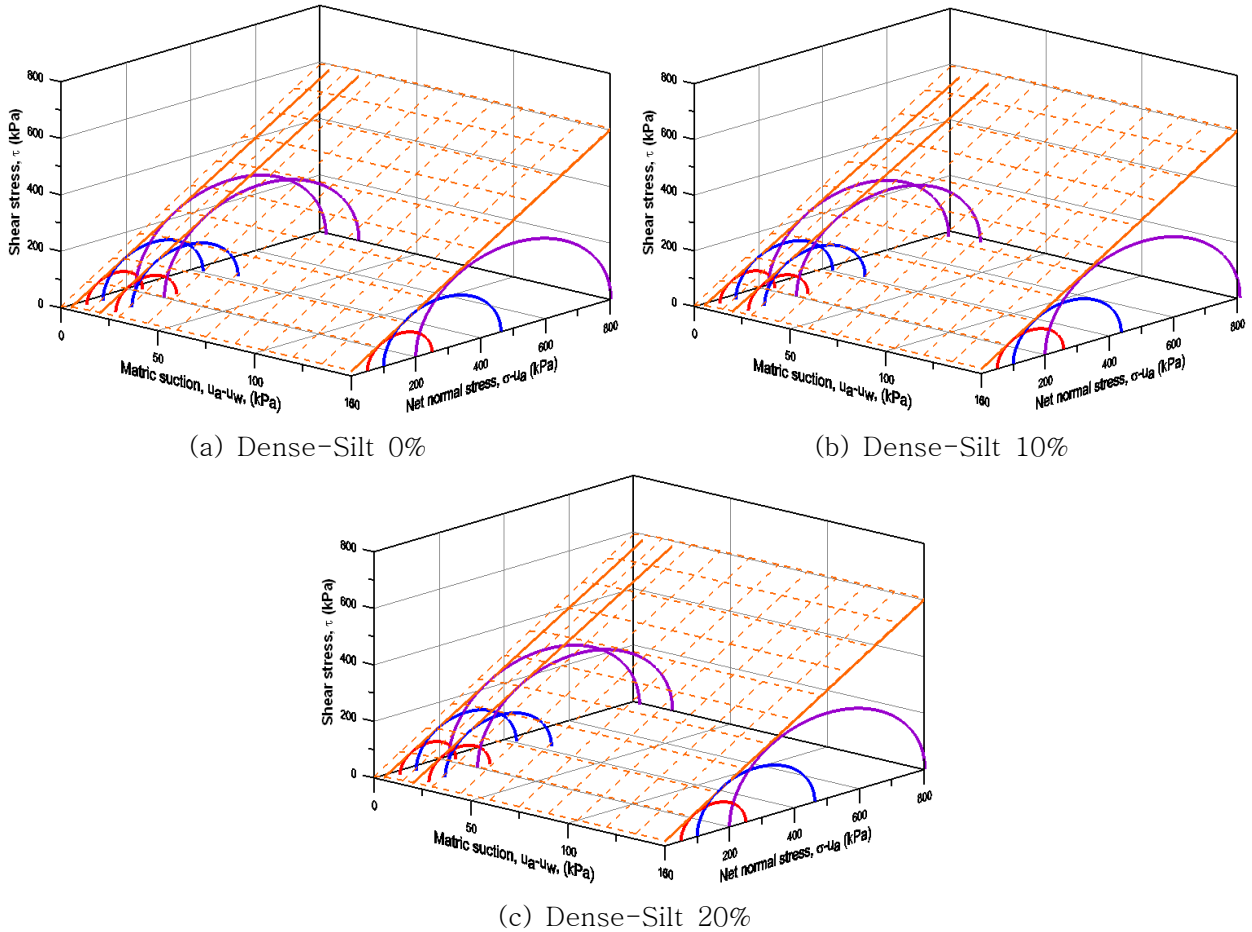


그림 5 축차응력-변형률의 관계

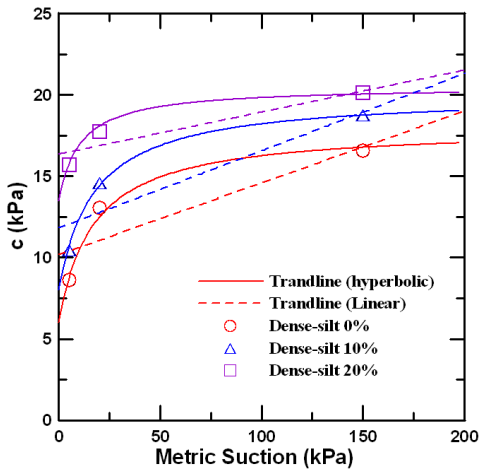


그림 6 점착력과 흡인력과의 관계

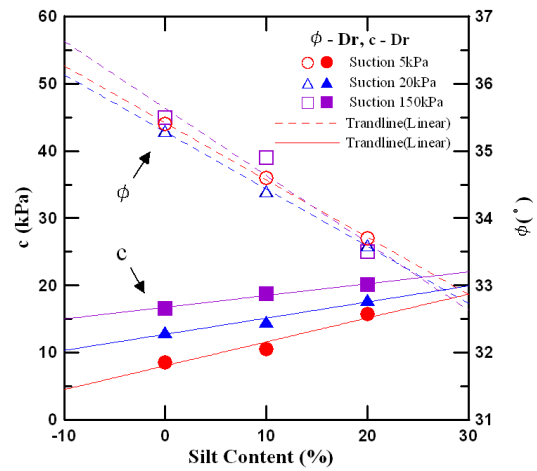


그림 7 점착력과 상대밀도와의 관계  
내부마찰각과 상대밀도와의 관계

표 3 불포화 실험결과표

상대밀도	실트함유율 (%)	메트릭석션 (kPa)	구속압 (kPa)	축차응력 (kPa)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
Dense	0	5	50	171	8.6	35.4
Dense	0	5	100	309		
Dense	0	5	200	585		
Dense	0	20	50	188	13.0	35.3
Dense	0	20	100	323		
Dense	0	20	200	598		
Dense	0	150	50	202	16.6	35.5
Dense	0	150	100	329		
Dense	0	150	200	606		
Dense	10	5	50	171	10.5	34.6
Dense	10	5	100	302		
Dense	10	5	200	565		
Dense	10	20	50	185	14.6	34.4
Dense	10	20	100	314		
Dense	10	20	200	574		
Dense	10	150	50	207	18.8	34.9
Dense	10	150	100	337		
Dense	10	150	200	608		
Dense	20	5	50	183	15.7	33.7
Dense	20	5	100	309		
Dense	20	5	200	558		
Dense	20	20	50	193	17.8	33.6
Dense	20	20	100	313		
Dense	20	20	200	566		
Dense	20	150	50	204	20.1	33.5
Dense	20	150	100	319		
Dense	20	150	200	577		

## 5. 결론

본 연구는 낙동강 지역에 넓게 분포하고 있는 실트질 모래의 전단강도특성을 규명하고자 낙동강 중류 지역의 모래와 실트를 채취하여 불포화토에 대한 비배기-비배수 조건에서의 삼축압축실험을 수행하였다. 기존의 삼축압축실험기에 Ceramic disk를 사용하여 개량하고 실트함유율과 흡인력에 따른 전단거동 특성을 밝히고자 각각의 조건을 달리하여 삼축압축실험을 시행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 낙동강 유역의 실트질 모래의 불포화토의 강도는 실트함유율이 증가할 수 록 감소하였으며, 흡인력이 증가할 수 록 증가하였다. 실트함유율의 증가에서는 모래에 세립분의 증가로 인해 내부마찰각이 감소하였기 때문이고 흡인력의 증가에서는 기존의 연구에서도 알 수 있듯이 겔보기 점착력이 커지는 요인에 기인한다.

(2) 낙동강 유역의 실트질 모래의 불포화 전단강도특성을 살펴보면, 점착력은 흡인력에 따라 비선형적으로 증가하였으며 내부마찰각의 경우 흡인력에 의한 영향은 적은 것으로 나타났다. 또한 세립분의 증가로 인해 점착력은 증가하였으며, 내부마찰각은 감소하였다.

## 참고문헌

1. 김상규, 류지협(1996), “불포화토의 투수 및 강도특성 측정”, 대한토목학회 1996년도 학술발표회 논문집(Ⅲ), 375-378.
2. 김영수, 김대만(2008), “실트 함유율에 따른 낙동강 모래의 반복전단거동 특성”, 대한지반공학회, 제24권 11호 2008년 11월 pp. 79 ~ 89
3. 신승봉(2009), “실트함유율에 따른 낙동강 모래의 불포화함수 특성”, 석사학위논문, 경북대학교
4. 이종천(2006), “불포화 풍화잔적토의 전단강도 및 함수특성곡선에 관한 연구”, 박사학위논문, 원광대학교
5. Bishop, A. W., and Donald, I. B., "The Experimental Study of partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus", Proceedings 5th ICSMFE, 1961, pp. 13-21.
6. Fredlund, D. G., and Morgenstern, N. R., "Stress State Variables for Unsaturated Soils", Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 103, No. GT5, 1977, pp. 447-466.
7. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H., "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons Inc., 1993, pp. 64-123.