

낙동강 모래의 세립분의 소성지수에 따른 비배수 반복 전단강도 Undrained Cyclic Shear strength of Nak-dong River sands according to Plasticity Index of fine-grained soils

김성호¹⁾, Sung-Ho Kim, 김영수²⁾, Young-Su Kim, 박성식³⁾, Sung-Sik Park, 신지섭⁴⁾, Ji-Seop Shin

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

²⁾경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engin., Kyungpook National University

³⁾경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engin., Kyungpook National University

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

SYNOPSIS : Around the Nakdong River which is one part of the repairing business of 4 Grand Rivers currently being constructed, sandy ground is distributed throughout the wide area. Many civil engineering structures such as small and medium sized dams, flood control basins, and redevelopment of reservoirs and retention reservoirs are scheduled to be constructed , so the prevention measures for liquefaction are surely needed. To identify such liquefaction, a lot of factor affecting the strength of liquefaction were studied through laboratory investigation. Most of the conducted study was about clean sands, but in the case of the real ground the sand can exist not in the clean conditions but in the conditions mostly including sand of fine grained soil. The sand of fine grained soil has become a significant factor to assess liquefaction because many cases of liquefaction happened in the silty and clayer soil. In this study, un-drained tests of plasticity index of fine grained particles were conducted with the sands from Nakdong River. In result, the study shows that dynamic shear strength characteristics differ according to the plasticity index.

Keywords : Liquefaction, Plasticity Index, Cyclic Shear Strength

1. 서 -론

액상화 현상은 느슨한 포화 사질토 지반에서 일어날 수 있는 가장 위험한 경우이다. 그렇지만 실제의 지반의 경우 깨끗한 모래지반이 존재하기 어렵고 대부분의 경우 세립자를 포함한 모래지반 상태로 존재한다. 모래지반의 경우는 많은 실험을 통해 반복거동을 충분히 분석하였으나 실트나 점토질이 함유된 지반의 경우는 아직 분명하게 분석되지는 않고 있고 그러한 지반의 세립자 함유율이나 간극비를 이용한 액상화 평가가 최근에 많이 연구되고 있다. 국내에서는 김영수(2009)는 반복전단강도에 대한 실트함유율의 영향에 대한 연구를 발표 하였고, 황대진(1993)은 일본에서 모래에 실트질의 함유량을 변화시켜가며 동적단순전단과 진동삼축시험을 실시하여 액상화강도를 측정하였다. 또한 이송(1994)은 서해안의 해성 실트질 모래를 이용하여 반복삼축시험을 수행하였으며, 정진섭 등(1999)이 정적 액상화의 발생에 미치는 세립분 함유율과 구속압력 그리고 상대밀도의 영향을 연구하였다. 국외에서는 F. Amini(2000)은 층상 실트질 모래에 대하여 액상화 시험을 실시하여 층상 흡과 균질한 흡에서 액상화 저항이 큰 차이가 없다고 하였으며, Troncoso(1990)은 시료 초기간극비를 0.85로 고정하여 실트 함유율 0~30%범위로 변화시켜 모래의 반복강도를 비교한 결과 실트 함유율이 증가함에 따라 반복강도가 감소함을 밝혔다. 또한 D. Erten et al.(1995)는 간극비를 고정하여 비소성 실트와 저소성 실트를 함유한 모래에 대하여 느슨한 상태와 중간 상태를 재현하여 변형률 제어의 반복삼축시험을 실시하였다.

본 연구에서는 세립분의 소성지수가 비배수 반복 전단강도에 미치는 영향을 알아보기고자 하였으며 변위발생에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구가 필요하다.

2. 실내시험방법

2.1 시험장치

본 시험에서 사용된 시험기는 자동화 삼축시험기로써 Soil Engineering Equipment Co.의 Clarence K. Chan(CKC)이 개발한 것이다. 처음에는 흙의 cyclic test 및 liquefaction potential, cyclic mobility 시험을 위해 개발되었던 것을 현재의 정적 및 동적 시험이 모두 가능한 형태로 개량한 것이다. 사진 2.1과 그림 2.1은 본 기기의 시험장치와 계통도를 나타내었다. Loading frame은 oil-actuator 혹은 air-actuator를 장착 할 수 있도록 구성되어 있는데 본 논문의 실내시험에는 air-actuator를 사용하여 응력제어의 동적반복삼축시험을 실시하였다



사진 2.1 CKC 시험장치

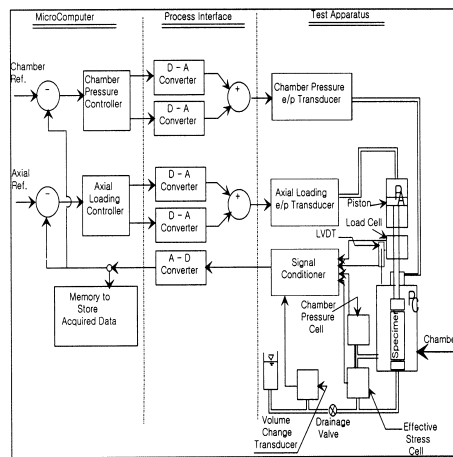


그림 2.1 시험장치의 계통도

2.2 시료 특성

본 연구에서는 세립분의 소성지수가 액상화 강도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 모래에 다양한 소성지수에 따른 세립분을 섞어 인위적으로 구성하였으며, 모래는 낙동강 중류 지역의 모래를 채취한 후 깨끗한 모래에 대한 시험을 위하여 #20체~#200체 사이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 clean sand로 만들어 시험에 사용하였다. 시험에 사용된 세립분은 실트, 카올리나이트, 벤토나이트를 사용하였으며 적당한 소성지수를 나타내기 위하여 실트 벤토나이트를 6:4로 섞어서 소성지수값이 나오도록 하였다.

시험에 사용된 시료에 대한 기본 물성치와 입도는 표 2.1~표 2.2, 그림 2.2에 나타내었다

표 2.1 세립분 모래의 물성치(Silt)

Index properties	Sand Contents of Fine grained soils	
	0%	10%
Specific gravity	2.637	2.640
D ₁₀ (mm)	0.19	0.08
D ₃₀ (mm)	0.22	0.22
D ₆₀ (mm)	0.25	0.24
C _u	1.316	3.038
C _z	1.038	2.445
USCS	SP	SP

표 2.2 세립분의 물성치

Soil	Silt	Kaoli-nite	Bento-nite	Silt60%+Ben-tonite40%
Specific gravity	2.640	2.620	2.710	2.670
Liquid limit(%)	34	39	473	86
Plastic limit(%)	26	21	96	36
Plastic index(%)	8	18	377	50

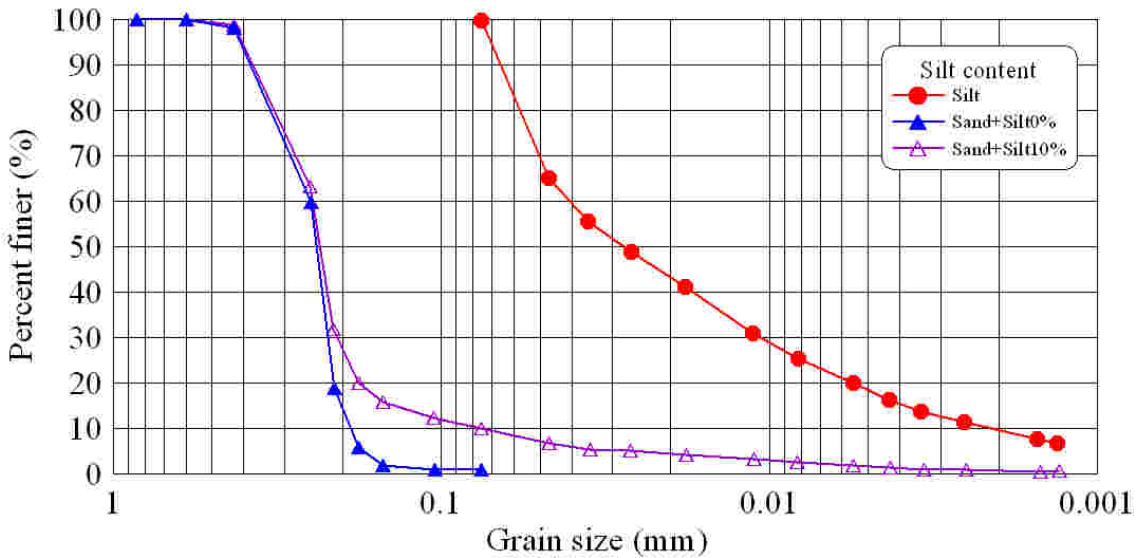


그림 2.2 세립분 모래의 입도(Silt)

2.3 시험 방법 및 내용

2.3.1 성형방법

본 논문에서 실시된 시험의 모든 시료 방법은 습윤다짐법에 의하여 성형되었다. 습윤다짐법은 시료에 물을 첨가하여 결보기 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 7층의 과소다짐법을 적용하였다. 과소다짐법은 각 층에 대해 동일한 시료무게를 서로 다른 다짐높이로 성형하여 시료 전체에 균일한 건조단위중량을 확보하는 시료성형방법이다.(Ni, 1987)

2.3.2 포화 및 압밀

시료 성형 후 원활한 포화를 위하여 CO_2 를 순환시켰다. 시료 하부로부터 CO_2 를 주입하여 상부로 나올 수 있게 하여 10~20분 정도 순환시켜 시료 내에 CO_2 가 존재할 수 있게 하였다. CO_2 의 경우 물과 같은 압축성을 보이며 공기보다 물에 더 잘 녹는 성질이 있기에 습윤퇴적법과 같이 포화도를 얻기 어려운 경우 널리 사용된다. 시료 하부로부터 물을 주입한 후, 시료 내에서 더 이상의 기체가 나오지 않을 때까지 계속 진행하였다. 그 후 시료에 back pressure(σ_b)을 가하여 포화를 시켰는데, 시료의 교란 방지를 위하여 σ_b 을 300kPa까지 점차적으로 서서히 가하면서 최종적으로 B value가 0.97이상이 되도록 하였다.

시료의 포화가 완료된 후 등방압밀단계로 넘어간다. 등방압밀조건에서는 같은 크기의 유효수직응력($\sigma_{1c'}$)과 유효수평응력($\sigma_{3c'}$)을 100kPa 가하여 압밀하였다.

이 때 압밀시간은 세립분의 함유량에 따라 조금씩 다르다. 세립분 함유량이 증가하더라도 과잉간극수압 소산이 충분히 이루어질 수 있도록 압밀시간을 충분히 주어 수행하였다.

2.3.3 반복전단시험

등방압밀 조건으로 압밀을 하였으며, 압밀이 완료된 후 응력제어의 비배수 반복삼축시험을 실시하였다. 가하여진 반복응력(q_{cy})의 0.1Hz 주기의 정현파(sine wave)를 이용하였는데, 정현파(sine wave)는 Silver et al.(1976)의 연구결과에서 권장된 파형으로 현재 모든 반복삼축시험에서 기본으로 사용되는 파형이다. 그림 2.3에 실험 후 결과로서 응력경로, 축변형률, 간극수압에 대한 그래프를 나타내었으며 표 2.3에 본 연구에서의 실험결과를 정리하였다.

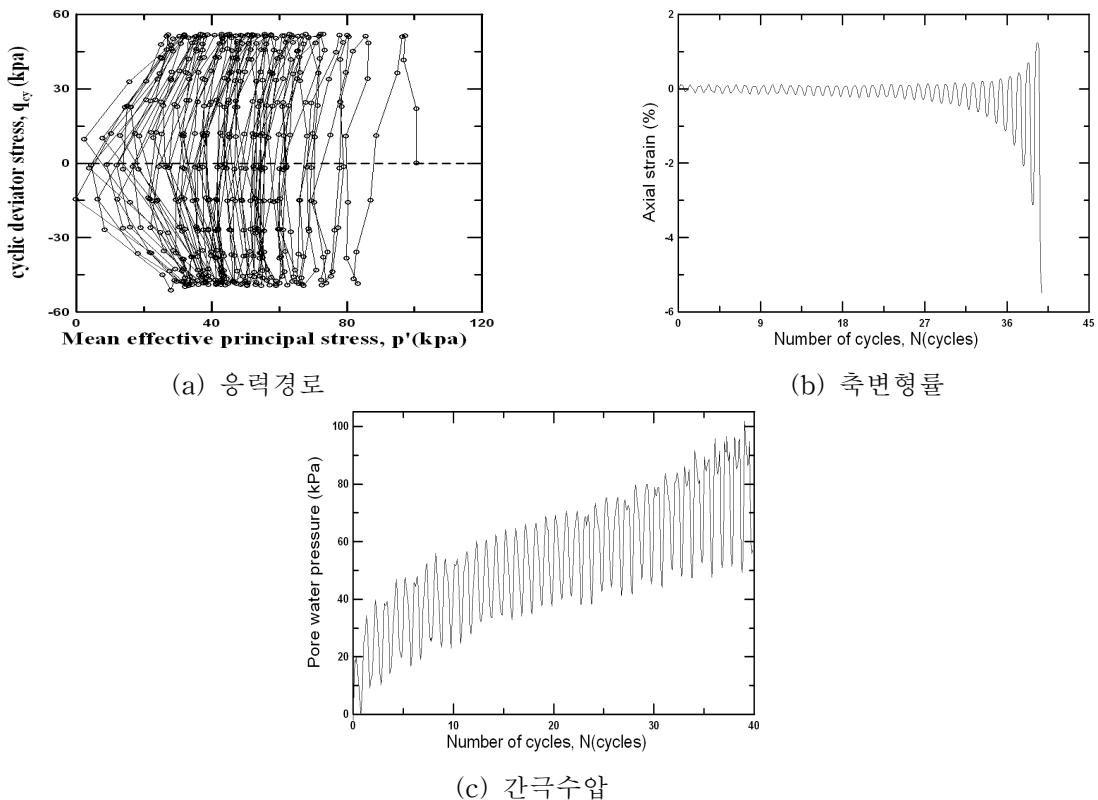


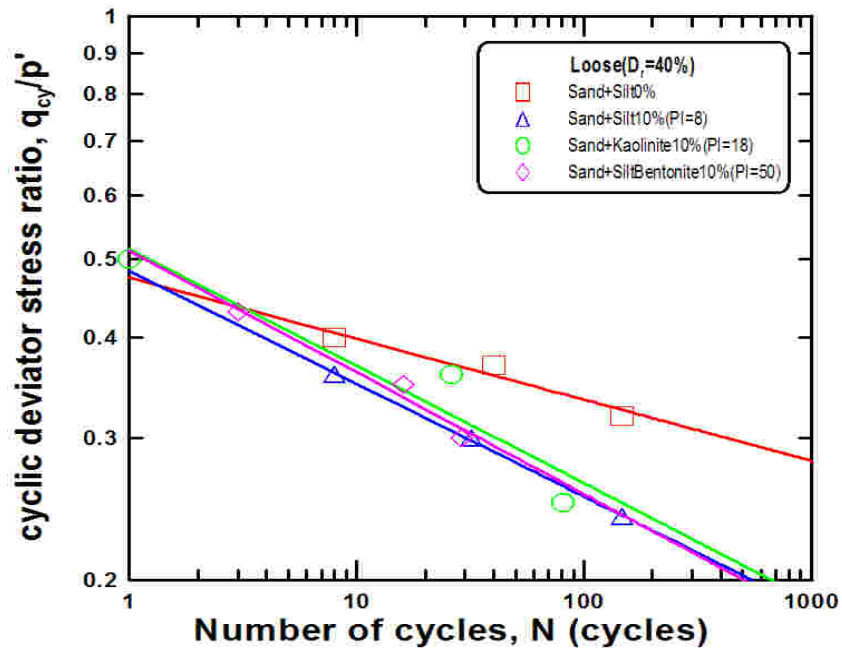
그림 2.3 Medium에서의 실험 결과 (10% 함유율, $q_{cy} = 51\text{kPa}$)

표 2.3 실험조건 및 실험결과

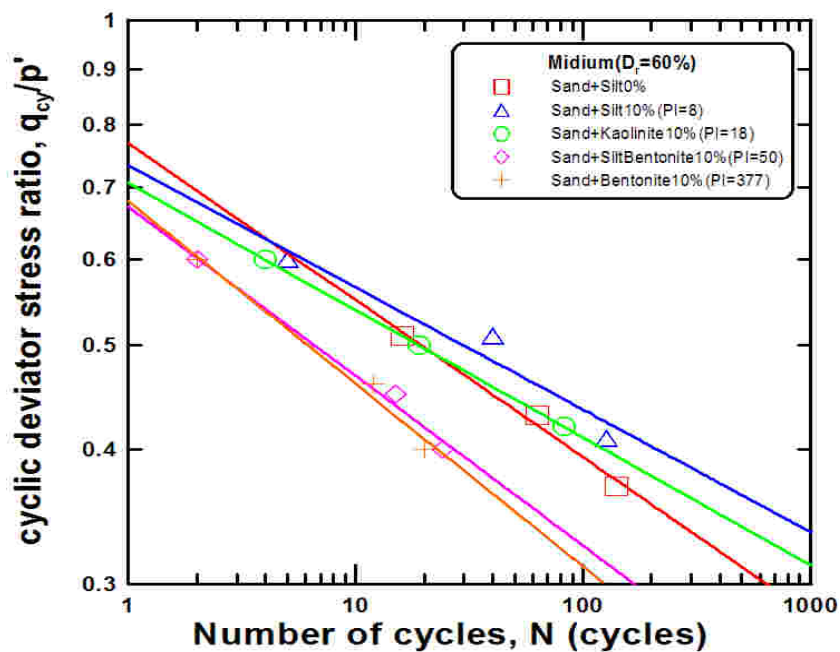
Content (%)	Sample state	Soil	q_{cy} (kPa)	Dry unit weight (kgf/m^3)	Void ratio, e	D_r (%)	Number of cycles, N
0%	Loose	Sand	32	1.298	1.045	41.0	147
			37				40
			40				8
	Midium		37	1.340	0.982	60.0	140
			43				63
			51				16
	Dense		46	1.384	0.919	79.0	151
			53				51
			58				32
10%	Loose	Silt	24	1.310	1.027	34.0	147
			30				32
			36				8
		Kaolinite	25	1.310	1.027	34.0	81
			36				26
			50				1
		Silt+Bentonite	30	1.310	1.027	34.0	29
			35				16
			43				3
	Medium	Silt	41	1.416	0.876	60.0	126
			51				40
			60				5
		Kaolinite	42	1.416	0.876	60.0	82
			50				19
			60				4
		Silt+Bentonite	40	1.416	0.876	60.0	24
			45				15
			60				2
		Bentonite	40	1.416	0.876	60.0	20
			46				12
			60				7
	Dense	Silt	44	1.510	0.759	80.0	161
			51				70
			64				14
		Kaolinite	50	1.510	0.759	80.0	49
			56				28
			70				9
		Silt+Bentonite	50	1.510	0.759	80.0	37
			60				13
			70				7

3. 소성지수에 따른 비배수 반복전단시험 결과

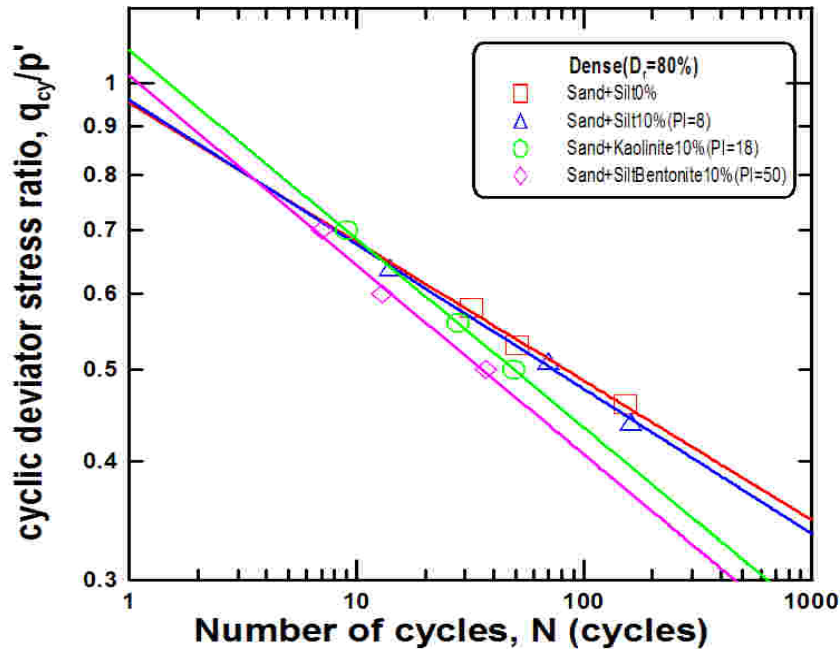
그림 3.1은 각각의 세립분에 따른 Loose, Midium, Dense에서의 반복축차응력비(q_{cy}/p')와 반복응력횟수(N)의 관계 그래프를 도시화하여 나타내었다.



(a) Loose



(b) Midium



(c) Dense

그림 3.1 Loose, Medium, Dense의 q_{cy}/p' 와 N 관계곡선

그림 3.1에서 Seed et al.(1983)이 지진 자료 분석에 의한 지진규모별 등가반복응력횟수에 따라 반복횟수(N)이 10으로 정하였으며 이는 국내의 경우 현재까지 규정된 바는 없지만 국내지진기록과 지진특성을 고려하여 M=6.75일 때의 반복횟수 10회일 경우로 정하였다. 상대밀도에 따라 지진규모 M=6.75에 대한 비배수 반복전단강도(R_f)를 구하여 각각의 소성지수에 대하여 그림 3.2에 나타내었다.

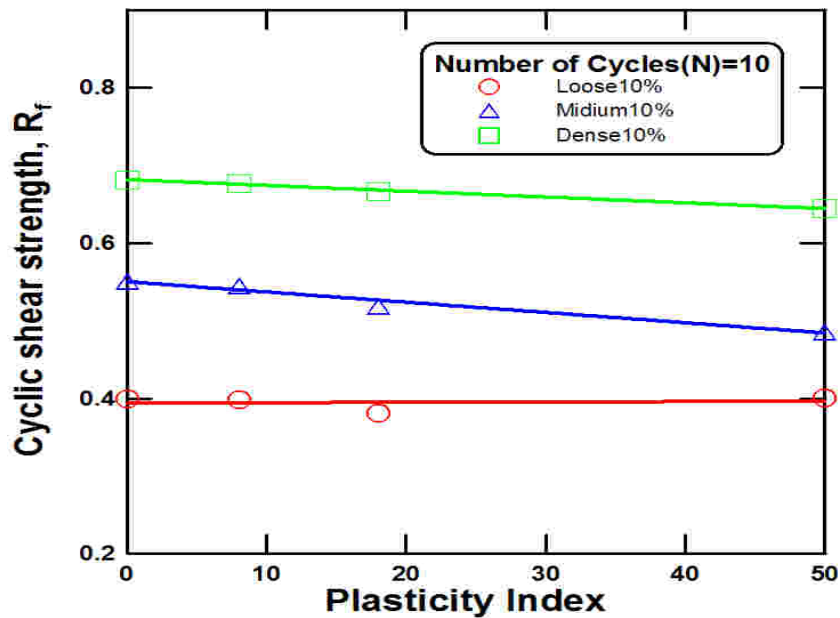


그림 3.2 반복횟수N=10일 경우 반복전단강도 (R_f)

4. 결과 분석 및 결론

본 연구에서 낙동강 유역에 분포하는 실트질 모래에 소성지수가 다른 세립분의 함유율을 10%로 혼합하여 느슨, 중간, 조밀한 상태에 따라 실내 비배수 반복삼축시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

1. 비배수 전단강도는 큰차이를 보이지 않았지만 소성지수가 증가할수록 감소하는 것을 알수 있었다. 특히 상대밀도가 Midium한 상태에서 가장 뚜렷한 결과를 나타내었으며 Loose, Dense한 상태 또한 확실한 차이를 확인 할 수 있었다. 또한, 조밀한 경우가 느슨한 경우보다 크게 나타나는 것으로 보아 상대밀도의 증가에 따라 강도의 차이가 크게 나타나는 것으로 사료된다.

2. 지진규모 $M=6.75$ 에 대한 비배수 반복전단강도(R_f) 또한 Midium과 Dense한 상태에서 소성지수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 뚜렷하게 확인 할 수 있었으며, Loose한 상태에서는 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다.

본 연구는 소성지수가 다른 세립분을 이용해 상대밀도를 달리하여 비배수 반복전단 강도시험에서 동적 액상화 거동에 대하여 소성지수가 끼치는 영향을 연구하였다. 하지만, 정적 액상화 거동에서도 소성지수에 미치는 영향은 무시할 수 없을만큼 크다는 것은 여러 국내·외 논문을 통하여 증명되었다. 향후 소성지수에 따라 상대밀도를 달리하여 정적상태에서의 액상화 거동에 대한 연구가 필요할 것이며 본 연구에서는 세립분함유율을 10%만 나타내었지만 가능하다면 좀 더 많은 세립분을 함유하여 정적·동적상태에서의 액상화 거동에 대하여 연구해야 할 필요가 있다.

참고문헌

1. 김대만 (2004), "Aging 효과에 따른 낙동강 모래의 비배수 전단거동 특성". 경북대학교 박사학위논문.
2. 나윤영(2008), "낙동강 모래의 비배수 반복전단 강도에 대한 실트 함유율의 영향" 경북대학교 석사학위논문.
3. 신지섭 (2007), "실트함유율에 따른 낙동강 모래의 반복전단거동", 경북대학교 석사학위논문.
4. 황대진 (1993), "실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구", 대한토목학회지, 대한토목학회, 제13권, 제2호, pp. 243~252.
5. Ishihara et. al. (1980), "Cyclic strength characteristics of tailings materials.", *Soils and Foundations*, Vol. 20 No. 4 pp 127~142.
6. D. Erten et al (1995), Cyclic undrained behavior of silty sand, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.* Vol.14, pp 115-123.
7. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I. (1983), "Evaluation of liquefaction potential using field performance data." , *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 458~482.