

# 시편의 성형방법이 반복삼축압축시험을 이용한 지반의 액상화 평가에 미치는 영향에 관한 연구

## A Study on the Effects of Sample Preparation on Liquefaction Estimation Using Cyclic Triaxial Test Conditions

이 익 효 <sup>*1</sup>	Lee, Ik-Hyo	김 동 수 <sup>*2</sup>	Kim, Dong-Soo
김 준 석 <sup>*3</sup>	Kim, Joon-Seok	황 지 훈 <sup>*4</sup>	Hwang, Ji-Hoon
서 성 호 <sup>*5</sup>	Seo, Seong-Ho		

### Abstract

The liquefaction potential of saturated sands under seismic loading conditions has been carefully considered by many investigations. Typical of these investigations is the laboratory determination of cyclic strength of sands by means of cyclic triaxial tests. This study was conducted to investigate the effects of the method of sample preparation on the liquefaction characteristics of remolded samples of saturated uniform sands. Cyclic triaxial tests were performed on saturated uniform sand compacted to the same density by 3 different procedures of pluvial compaction through air, pluvial compaction through water and vibratory compaction. It was validated that the cyclic stress ratio of remolded saturated uniform sands by different compaction procedures at the same density was very different.

### 요 지

지진하중조건에서 포화된 모래의 액상화 가능성은 심도 있는 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구에서 대표적인 것은 실험실에서 반복삼축압축시험에 의하여 모래의 반복강도를 결정하는 것이다. 본 연구는 재성형된 포화 균등모래의 액상화 특성에 있어서 시편의 성형방법에 따른 영향을 검증하기 위하여 수행되었다. 건조시료의 공기중낙하다짐, 습윤충다짐, 습윤진동충다짐 등 3가지 방법에 의하여 동일한 밀도로 다짐된 포화된 균등한 모래에 대하여 삼축압축시험이 수행되었다. 같은 밀도에서 다른 방법에 의하여 성형된 포화된 균등한 모래의 액상화 저항특성인 반복응력비는 크게 다른 것으로 확인되었다.

**Keywords** : Cyclic triaxial test, Liquefaction, Pluvial compaction through air, Pluvial compaction through water, Vibratory compaction

### 1. 서 론

지진에 의한 지반의 액상화 현상에 대하여 1964년 일본의 Niigata 지진 이후에 활발한 연구가 수행되었으며

반복삼축압축시험을 이용한 액상화평가방법(Seed 등, 1971, 1975), 원위치시험결과를 이용한 액상화평가방법(Christian 등, 1975) 등 여러 가지 평가방법이 제안되었다. 특히 Seed 등에 의하여 제안된 반복삼축압축

\*1 정회원, 여수대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Division of Civil and Environmental Engrg., Yosun National Univ.)

\*2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수 (Member, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

\*3 정회원, 청운대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Chungwoon Univ., jskim@www.cwunet.ac.kr)

\*4 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 졸업 (Member, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

\*5 정회원, 여수대학교 건설·환경공학부 박사과정 (Member, Division of Civil and Environmental Engrg., Yosun National Univ.)

시험을 이용한 액상화현상 예측방법은 매우 중요한 분석방법으로 사용되고 있다. 반복삼축압축시험을 이용한 지반의 액상화현상에 대한 연구는 모래에 대한 연구 뿐 아니라 실트질 모래(Erten 등, 1995), 자갈질 모래(Evan 등, 1995)에 대해서도 연구가 수행되었다. 우리나라에서도 반복삼축압축시험을 이용한 액상화 평가에 많은 연구수행이 있었으나 반복삼축압축시험에 의한 액상화평가방법에 있어서 가장 큰 문제점은 불교란 시료를 이용한 시험용 시편의 성형이 매우 어렵다는 점이다. 따라서 일반적으로 시험용 시편은 교란시료를 이용하여 성형된 후 시험에 사용된다. 이때 시험용 시편을 성형하는 방법이 시험결과에 영향을 미친다는 것이 모래에 대하여 Mulilis 등(1977)에 의하여 제안되었으나 국내에서는 우리나라 사질토에 대한 영향의 정도에 대하여 연구결과가 제안되지 못하였다. 따라서 실험자에 따라 시편성형방법이 각기 다르게 선정되어 실험되므로써 결과에 대한 객관적 평가가 사실상 어려운 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 시편성형방법에 따른 반복삼축압축시험 결과의 차이를 검증하기 위하여 균등한 모래인 주문진 표준사를 시료로 사용하여 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 3가지 시편성형방법 즉, 건조시료의 공기중낙하다짐(pluvial compaction through air), 습

윤층다짐(pluvial compaction through water), 습윤진동층다짐(vibratory compaction)의 방법으로 시편을 성형하여 반복삼축압축시험을 실시하고 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료준비 및 실험조건

본 연구에서는 시편의 성형방법에 따른 액상화 저항도의 변화를 실험적으로 확인하기 위하여 균등한 모래인 주문진 표준사를 재료로 이용하여 공기중낙하다짐, 습윤층다짐, 습윤진동층다짐 등 3가지 시료성형방법을 사용하여 시편을 성형한 후 액상화 실험을 실시하였다. 실험의 기본조건인 유효구속응력은 50kPa로 하였으며, 3가지 시편성형방법에 대하여 동일한 상대밀도로 다짐을 실시하여 동일한 조건이 되도록 하였다(표 1). 액상화 발생시점은 구속압력과 과잉간극수압이 같아지는 초기액상화를 기준으로 하였다.

실험에 사용된 시료의 최대건조단위중량은  $1.639\text{ton/m}^3$ , 최소건조단위중량은  $1.361\text{ton/m}^3$ 이며 입도분포는 그림 1과 같다.

표 1. 실험용 시편의 건조단위중량과 상대밀도

시험번호	공기중낙하다짐		습윤층다짐		습윤진동층다짐	
	건조단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	상대밀도 (%)	건조단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	상대밀도 (%)	건조단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	상대밀도 (%)
1	1.464	41.48	1.474	45.20	1.464	41.48
2	1.467	42.60	1.480	47.40	1.473	44.83
3	1.472	44.46	1.464	41.48	1.467	42.60
4	1.464	41.48	1.476	45.94	1.461	40.35
평균	1.467	42.51	1.474	45.01	1.466	42.32

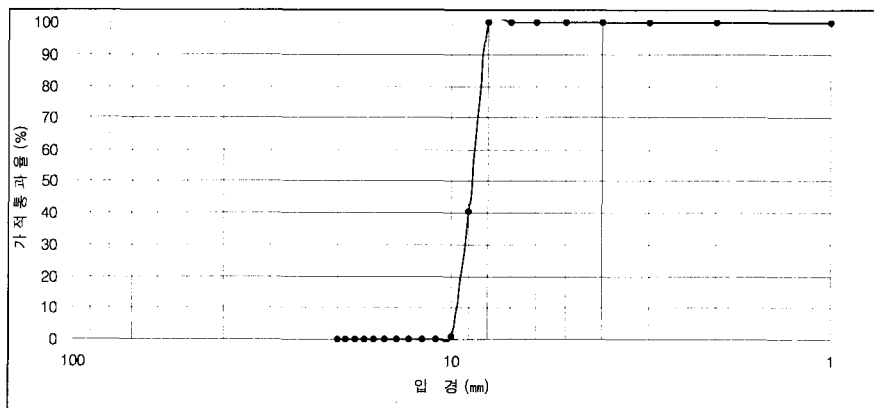


그림 1. 입도분포(표준사)

## 2.2 실험방법

각기 다른 시료성형 방법에 따라 성형된 시료를 삼축 시험기의 셀(cell)에 안치한 후 물 순환 과정을 통해 시료를 1차로 포화 시켰다(그림 2). 먼저 시료의 아래 부분으로는 바닥판(bottom plate)의 다공판(porous stone)을 통해 물이 공급되도록 하고, 시료의 윗 부분으로는 윗 덮개(top cap)의 다공판을 통해 진공압을 가하였다. 시료내부에 진공압이 작용되면 바닥판을 통해 물이 시료 내부로 유입되고, 내부에 유입된 물은 진공압으로 인해 시료내부의 공기와 함께 윗덮개(top cap)에 연결된 관을 통해 빠져나오게 된다. 이 때, 물과 공기는 다공판을 거치므로, 흡입자의 유실은 없었다.

물 순환과정만으로는 시료를 완전 포화시킬 수 없기 때문에 물 순환과정을 수 시간동안 수행한 후 배수라인을 배수밸브에 연결하고 50kPa의 구속압력(cell pressure)을 가하면서 배압(back pressure)을 가하여 시료를 2차 포화시켰다. 배압과 구속압력(cell pressure)의 차이가 반복 삼축시험을 수행할 유효 구속압 보다 커지게 되면, 시료가 과압밀되기 때문에 배압과 구속압력의 차이가 반복삼축시험을 수행할 유효 구속압(압밀압)보다 작게 유지하면서 배압을 증가시켰다. 배압포화는 배압을 단계별로 증가시키면서, 간극 수압계수 B를 측정하여 0.95 이상이 될 때까지 수행하였다.

간극수압계수 B가 0.95 이상이 되면, 배압을 일정하게 유지한 상태에서 구속압력과 배압의 차이가 반복삼축시험을 수행할 유효 구속압이 될 때까지 구속압력을 증가시키고 난 후에 시료의 축변형률과 체적 변형률을 측정하여, 1차 압밀이 끝나면 압밀을 완료하였다. 시료에 등

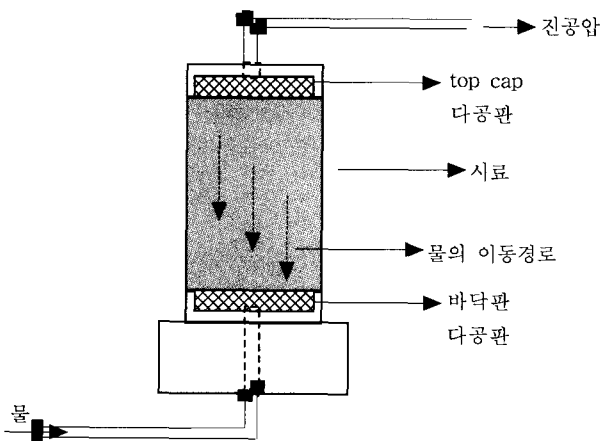


그림 2. 시편내부의 물 순환 과정

방의 유효구속압( $\sigma'_0$ )이 가해지고 있음을 확인하였으며, 본 연구에서 유효 구속압의 크기는 50kPa를 적용하였다.

시료에 연결된 배수밸브를 잠근 후, 정현파 형태의 반복 축차응력을 0.1Hz의 주기로 가하면서 축차응력, 축변형률, 간극수압을 측정하였다. 본 실험에 사용된 시험기기는 C.K.Chan 형태의 진동삼축시험기로서 그림 3과 같다.

### 2.2.1 공기중낙하 다짐

공기중 낙하법은 바닥판에 몰드와 멤브레인을 장치한 후, 몰드 내부로 시료를 낙사(落砂)시켜 시료를 성형하는 방법이다. 시료는 다공판이나 구멍 뚫린 마개가 장치된 플라스크에 일정량을 넣은 후, 성형시 이를 뒤집어 몰드 내부로 낙사시킨다.

공기중 낙하법으로 이루어진 시료의 밀도에 영향을 줄 수 있는 요소는 낙하공의 직경과 낙하공의 높이이다. 이중에 낙하공의 직경이 매우 크며, 낙하공의 높이는 15~50cm의 범위에서는 영향이 극히 작으나, 본 연구에서는 시료의 균질성을 위하여 낙하공의 직경은 5mm의 플라스틱 마개를 사용하였고, 낙하 높이는 100mm를 적용하였다.

### 2.2.2 습윤층다짐

습윤층다짐은 몰드내부에 각층에 대해 동일한 중량의 시료를 넣고, 층별로 탬퍼를 이용해 다짐하여 시료를 형성하는 방법이다. 일반적으로 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 단위 중량을 목표로 6층의 과소다짐법(under-compaction)을 적용하였다. 과소다짐법은 각 층에 대해 동일한 시료무게

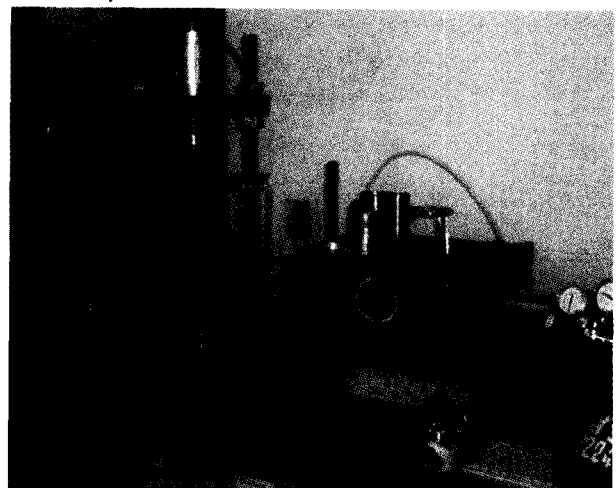


그림 3. 실험에 사용된 C.K.Chan 형태의 진동삼축압축시험기

를 서로 다른 다짐높이로 성형하여 시료 전체에 균일한 건조단위중량을 확보하는 시료성형방법이다(Ni, 1987). 즉, 최하단층의 다짐 높이를 가장 높게 하고, 층이 높아질 수록 일정한 비율로 높이를 낮춰, 최상층에서 원하는 시료 높이를 맞출 수 있도록 다짐 높이를 조절하는 방법이다. 본 실험에서는 함수비 8%의 시료에 대해 과소다짐법을 적용하여 탬퍼 층다짐을 수행하였다.

### 2.2.3 습윤진동층다짐

습윤진동층다짐 방법은 습윤층다짐 방법과 대부분 같으나, 층다짐 시 탬퍼를 사용하지 않고, 가진원을 이용해 몰드나 바닥판에 진동을 가하여 다짐으로써 시료를 성형하는 방법으로서 본 실험에서는 함수비 8%의 시료에 대해 과소다짐법을 적용하여 저주파수의 진동기를 몰드에 수평으로 가하는 방법으로 시편을 성형하였다.

## 2.3 실험결과

### 2.3.1 실험 결과

#### (가) 공기중낙하다짐

공기중 낙하 다짐에서 유효구속응력 50kPa의 동일한 조건에서 반복삼축시험을 통해 시료 내부에 발생하는 최대 전단력을 구속압으로 정규화(normalize)한 반복전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR) 0.360, 0.348, 0.264, 0.258 등 4경우에 대하여 실험을 수행하였으며, 각각의 반복전단응력비에 대해 액상화 도달에 필요한 반복재하횟수(number of cycles)를 측정하였다. 액상화 도달 시점은 과잉간극수압이 유효 구속압을 넘어서는 시점을 기준으로 하였다. 각각의 반복전단응력비에 대한 반복재하횟수(number of cycles)는 1, 1, 8, 253 이었다.

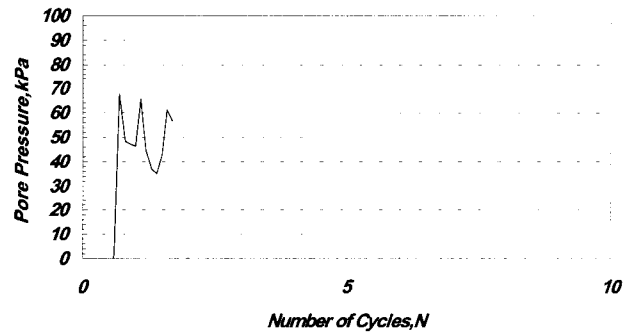
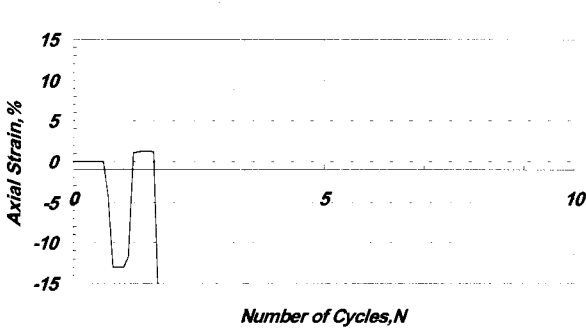


그림 4. 공기중낙하다짐[CSR=0.360]

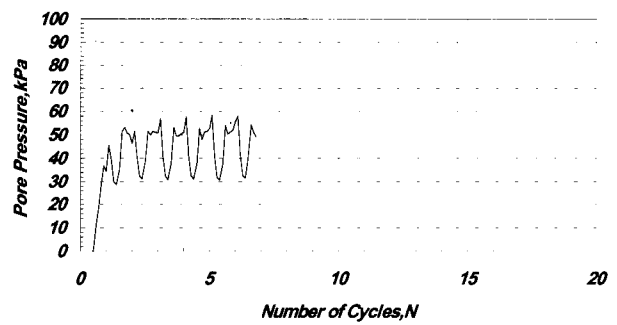
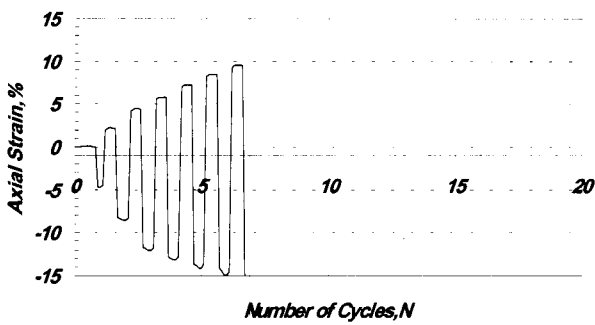


그림 5. 공기중낙하다짐[CSR=0.348]

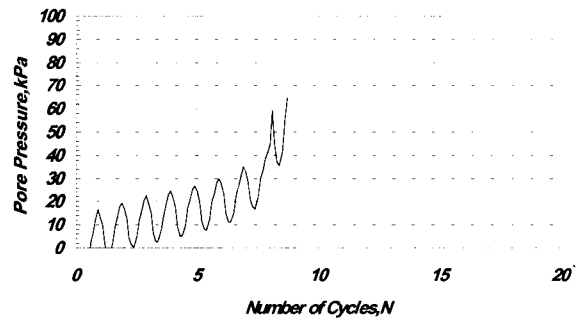
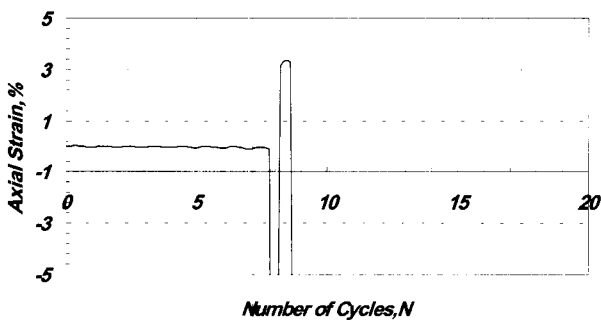


그림 6. 공기중낙하다짐[CSR=0.264]

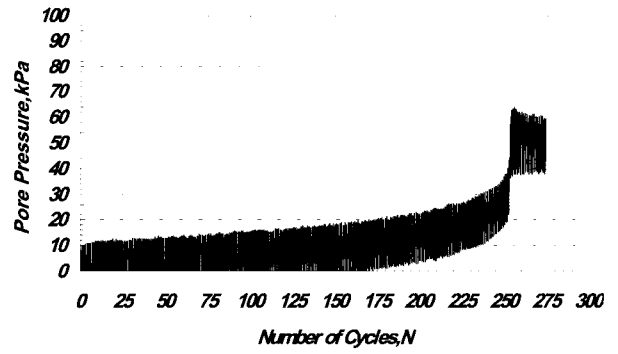
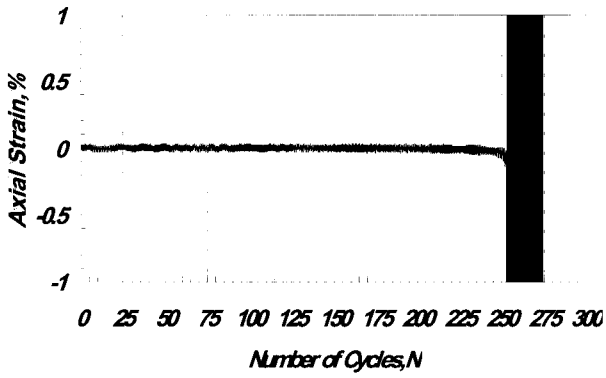


그림 7. 공기중낙하다짐[CSR=0.258]

(나) 습윤충다짐

습윤충다짐에서 유효구속응력 50kPa의 동일한 조건에서 반복전단응력비(CSR) 0.369, 0.355, 0.331, 0.329

등 4경우에 대하여 실험을 수행하였으며 각각의 반복전단응력비에 대한 반복재하횟수(number of cycles)는 4, 3, 112, 38이었다.

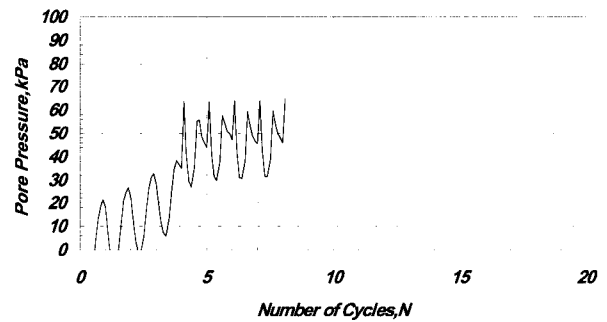
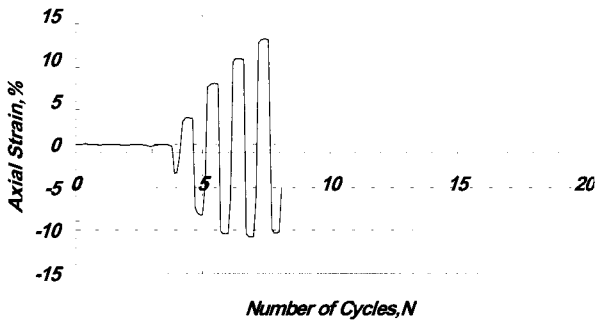


그림 8. 습윤충다짐[CSR=0.369]

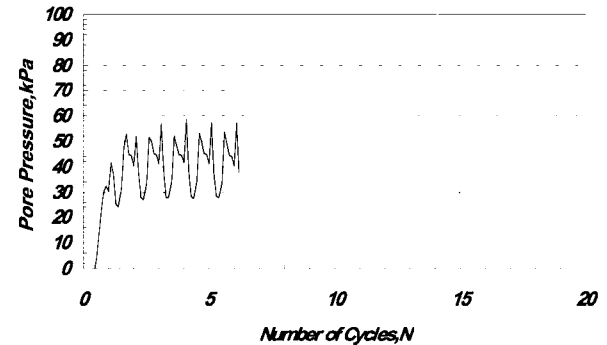
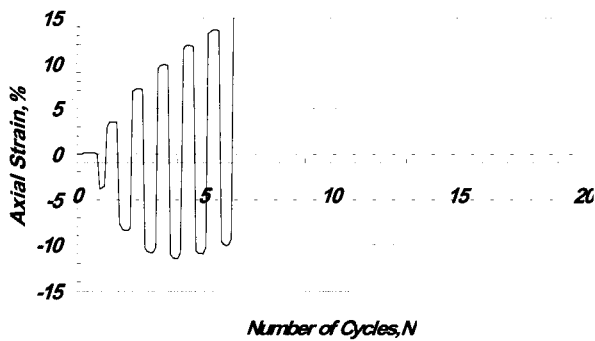


그림 9. 습윤충다짐[CSR=0.355]

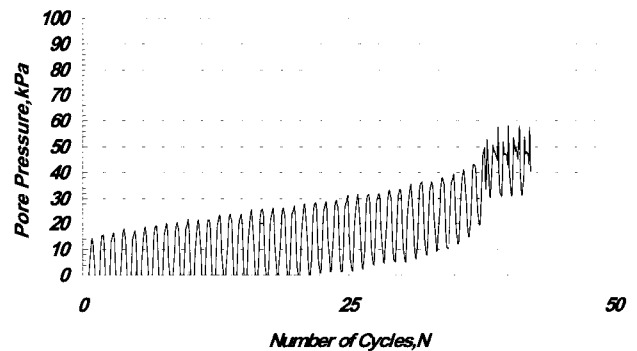
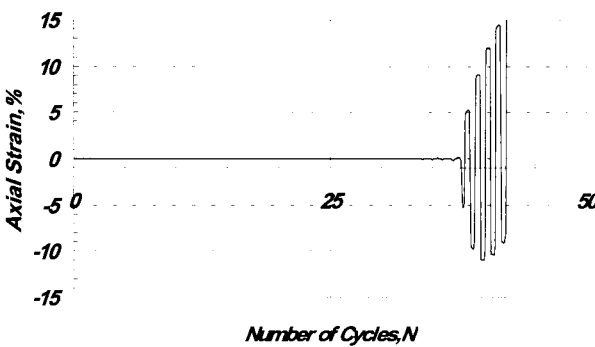


그림 10. 습윤충다짐[CSR=0.331]

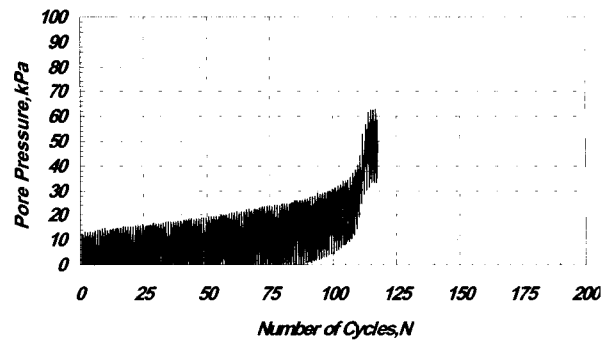
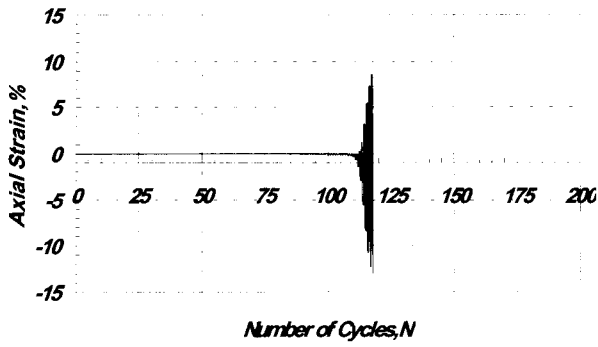


그림 11. 습윤충다짐[CSR=0.329]

(다) 습윤진동충다짐

습윤진동충다짐에서 유효구속응력 50kPa의 동일한 조건에서 반복전단응력비(CSR) 0.435, 0.387, 0.355, 0.343

등 4경우에 대하여 실험을 수행하였으며 각각의 반복전단응력비에 대한 반복재하횟수(number of cycles)는 9, 8, 37, 31이었다.

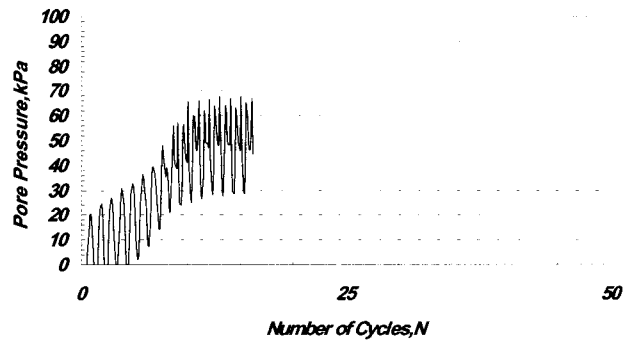
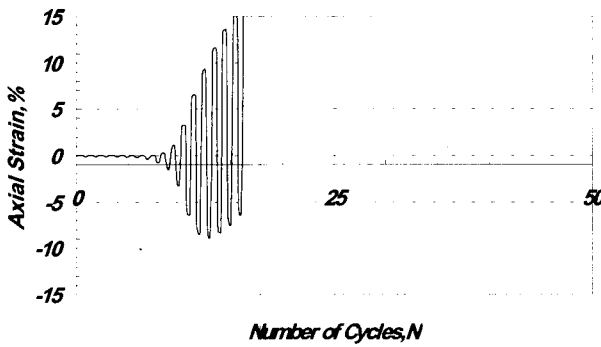


그림 12. 습윤진동충다짐[CSR=0.435]

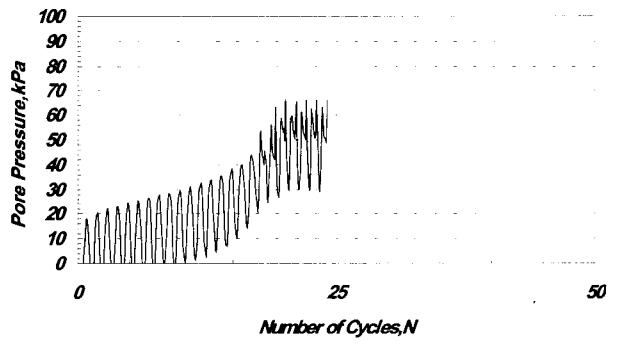
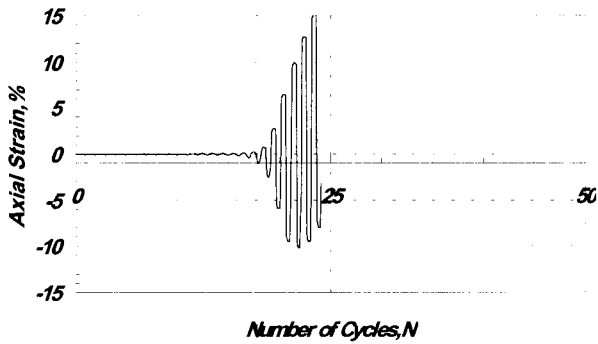


그림 13. 습윤진동충다짐[CSR=0.387]

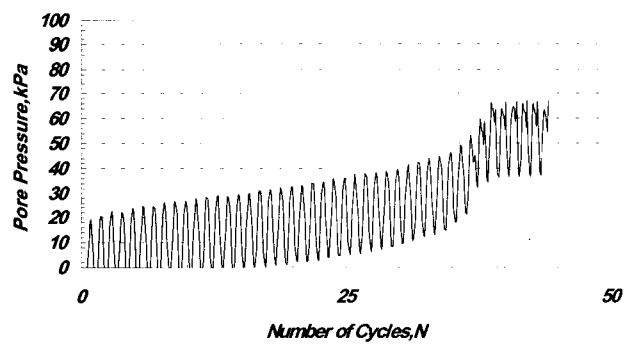
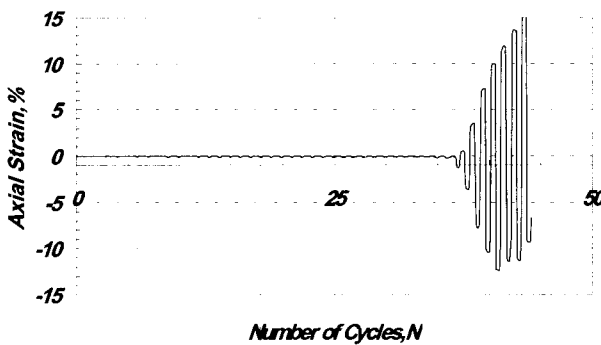


그림 14. 습윤진동충다짐[CSR=0.355]

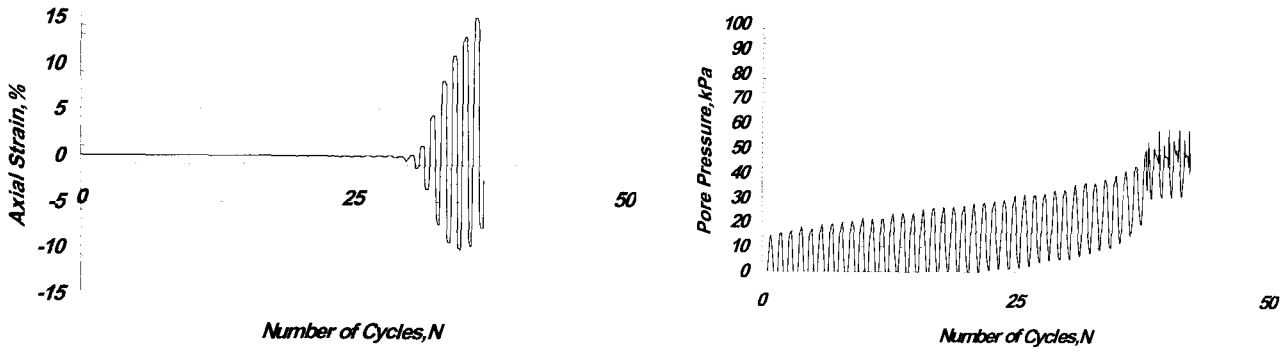


그림 15. 습윤진동충다짐[CSR=0.343]

표 2. 반복삼축압축시험 결과

시험	공기중낙하다짐		습윤충다짐		습윤진동충다짐	
	반복재하횟수	반복전단 응력비	반복재하횟수	반복전단 응력비	반복재하횟수	반복전단 응력비
1	1	0.360	4	0.369	9	0.435
2	1	0.348	3	0.355	18	0.387
3	8	0.264	38	0.331	37	0.355
4	253	0.258	112	0.329	31	0.343

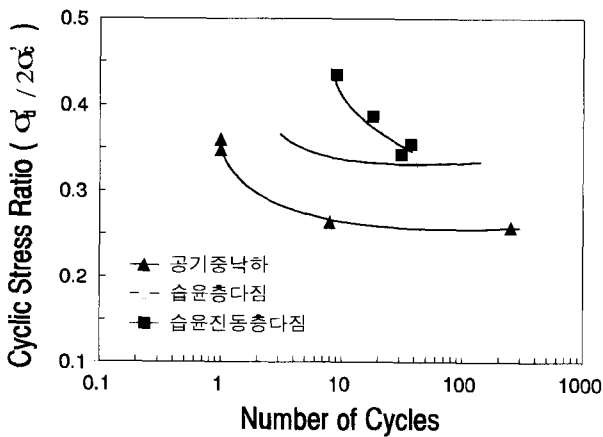


그림 16. 반복삼축압축시험 결과

### 2.3.2 실험결과 분석

3가지 종류의 시편 성형방법에 따라 각각 4가지 반복 전단응력비에 대하여 실험을 수행한 결과 전체적으로 반복전단응력비가 작을수록 액상화 도달에 필요한 반복재하횟수가 많아지는 일반적인 경향을 보였으며, 실험결과를 그림 16에 그래프로 표시하였다. 그림 16에서 시편의 성형방법에 따라 반복재하횟수와 반복전단응력비 상관그래프가 각각 다른 그래프로 나타났으며, 액상화에 대한 저항력의 크기는 반복재하횟수가 약 40 이내에서는 습윤진동충다짐, 습윤충다짐, 공기중낙하다짐의 순서로 큰 것으로 나타났다. 또한 반복재하횟수에 따라 액상화 가능성이 큰 차이를 보였으며, 예로써 반복재하횟수 10에서 액상화에 대한 저항력을 나타내는 반복

전단응력비는 시편의 성형방법에 따라 약 50%의 차이를 보였다. 따라서 반복삼축압축시험에 의한 액상화 평가방법에서는 시료의 성형방법이 결과분석에 큰 영향을 미치는 것을 균등한 입도를 갖는 우리나라 표준사에서 확인할 수 있었다.

### 3. 결론

본 연구에서는 입자가 균등한 주문진 표준사를 이용하여 3가지 시편성형방법 즉, 건조시료의 공기중낙하, 습윤충다짐, 습윤진동충다짐의 방법으로 시편을 성형한 후 동일한 조건에서 반복삼축압축시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 입자가 균등한 모래에 있어서 시편의 성형방법에 따라 반복재하횟수와 반복전단응력비 상관그래프가 각각 다른 관계를 나타내었으며, 따라서 입자가 균등한 모래에 있어서 시편의 성형방법이 반복삼축압축시험에 의한 액상화평가결과에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.
- (2) 액상화가능성을 판단하는데 중요한 요소인 반복전단응력비는 동일한 조건에서 반복재하횟수가 40회 이내에서는 습윤진동충다짐, 습윤충다짐, 공기중낙하의 순서로 크게 나타났다.
- (3) 습윤충다짐, 습윤진동충다짐의 경우 반복전단응력

비가 작은 영역에서는 액상화 도달에 필요한 반복재하횟수가 비슷해지는 경향을 보였으나, 공기중낙하 다짐의 경우는 반복전단응력비와 관계없이 확연한 차이를 보였다. 또한 습윤층다짐, 습윤진동층다짐의 경우에도 액상화 평가 곡선의 기울기 및 형상에서 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다.

즉, 반복재하횟수와 반복전단응력비 상관그래프에서 반복재하횟수 10에 대하여 시편의 성형방법에 따라 약 50%의 반복전단응력비의 차이가 있음을 알 수 있었다.

- (4) 따라서, 반복삼축압축시험에 의한 액상화평가방법에 있어서 지금까지 시편의 성형방법에 대해서는 특별한 규정이 없었으나 시편의 성형방법이 액상화 가능성의 판단에 매우 큰 영향을 미칠 수 있음이 확인 되었으므로 향후 합리적인 규정을 마련하여야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-1999-000306-0)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 강병희, 박근보, 강대성(2000), "실트질 모래의 액상화 후의 정적 거동", 한국지반공학회 논문집, 제16권 제5호, pp.27-36.
2. 박종관, 김상규, 한성길(1998), "진동삼축시험을 통한 실트질 모래의 액상화 강도에 대한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제14권 제1호, pp.59-70.
3. Erten, D. and Maher, M.H.(1995), "Cyclic Undrained behavior of Silty Sand", *Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, Vol.14, pp.115-123.
4. Evans, M.D. and Zhou, S.(1995), "Liquefaction Behavior of Sand-Gravel Composite", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.121, No.3, pp.287-298.
5. G. R. Martin, W. D. Liam Finn, H. B. Seed(1975), "Fundamentals of liquefaction under cyclic loading", *Journal of Geotechnical Engineering Div.*, ASCE, Vol.101, No.GT5, pp.423-438.
6. H. Bolton Seed, William H. Peacock(1971), "Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Div.*, ASCE, Vol.97, No.SM8, pp.1099-1119.
7. JGS, "Method for Cyclic Undrained Triaxial Test on Soils", JGS 0541-2000, *The Japanese Geotechnical Society*.
8. John T. Christian, William F. Swiger(1975), "Statistics of liquefaction and SPT results", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.101, No.GT11, pp.1135-1150.
9. J. Paul Mulilis, H. Bolton Seed, Clarence K. Chan(1977), "Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.103, No GT2, pp.91-107.
10. Ni S.H.(1987), "Dynamic Properties of Sand Under True Triaxial Stress States from Resonant Column/torsional Shear Tests", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.

(접수일자 2002. 7. 26, 심사완료일 2003. 3. 27)