

# 실지진 모사를 위한 조합형 정현하중의 적용성 검증

최재순\*

Choi, Jae-soon\*

## Verification of Combined Sinusoidal Loads for Simulating Real Earthquakes

### ABSTRACT

Since the Gyeongju earthquake in 2016 and the Pohang earthquake in 2017, the performance of various dynamic tests for seismic design has increased in Korea. However, sinusoidal load has been continuously used in the conventional laboratory tests to evaluate liquefaction potential and determine input-parameters in the numerical analysis. However, recent research results suggest that it is difficult to accurately simulate excess pore water changes of the ground under earthquake loads. In order to solve this problem, this study proposes a combined sinusoidal loading and examines its applicability to the cyclic shear and triaxial test. Also, its validity is examined through performing of shaking-table test and numerical analysis based on the effective stress model. As a result, it was found that the proposed combined sinusoidal loading can more accurately simulate the change of excess pore water pressure in saturated soils under real earthquake load than the sinusoidal load.

**Key words :** Sinusoidal load, Real earthquake, Combined sinusoidal load, Shaking table test, Effective stress analysis

### 초록

2016년 경주지진과 2017년 포항지진이 발생한 이후, 우리나라 내진설계에 있어서 다양한 실내진동시험의 수행이 증가하고 있으나, 액상화 평가나 수치해석의 입력파라미터를 산정하기 위한 실내진동시험에서는 이전부터 사용해 오던 정현하중의 이용이 계속되고 있다. 그러나, 최근 정현하중으로는 지진하중으로 야기되는 지반 내 과잉간극수압의 거동을 정확하게 모사하기 어렵다는 연구결과가 발표되며 정현하중을 대신하여 동하중의 개발에 대한 논의가 주목을 받기 시작하였다. 이 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 조합형 정현하중을 제안하고 주문진 표준사를 대상으로 한 진동전단실험과 진동삼축압축시험을 통해 그 적용성을 검토하였으며 추가로 진동대시험과 유효응력해석모델에 기초한 수치해석을 통해 그 타당성을 검토하였다. 검토 결과, 제안된 조합형 정현하중이 정현하중보다 실지진하중 하에서의 포화지반 내 과잉간극수압의 거동 변화를 잘 모사할 수 있음을 발견하였다.

**검색어 :** 정현하중, 실지진하중, 조합형 정현하중, 진동대시험, 유효응력해석

## 1. 서론

2016년 9월 지진 규모 5.8의 경주지진과 2017년 11월 지진 규모 5.4의 포항지진이 발생한 이후, 우리나라 내진설계에 있어서 액상화 평가를 위한 실내진동시험의 수행뿐만 아니라 진동대시험 또는 원심모형시험과 같은 지진모의시험의 수행이 점차 확대되어 가고 있다.

지반동역학 분야에서 실내진동시험은 액상화 연구와 유효응력해석법 개발연구에 주로 이용되어 왔다. 특히, 일본의 경우에는 진동삼축시

\* 종신회원 · 교신저자 · 서경대학교 토목건축공학과 부교수 (Corresponding Author · Seokyeong University · [geotech@skuniv.ac.kr](mailto:geotech@skuniv.ac.kr))

Received November 4, 2019/ revised November 7, 2019/ accepted November 12, 2019

험, 진동전단시험, 진동비틀림시험과 같은 실내진동시험의 수행은 보조적인 역할을 떠나 진동대시험과 함께 액상화를 평가하는 데 직접 사용되고 있는 실정이다. 예를 들어, 일본 항만 내진설계를 위한 액상화 평가의 경우, 간편법을 통해 지진의 가속도 수준과 지반의 물성을 보정한 후, 상관관계에 대한 구역설정을 통해 액상화 발생 가능성이 없는 경우(1), 액상화 발생 가능성이 낮은 경우(2), 액상화 발생 가능성이 높은 경우(3), 액상화 발생 가능성이 매우 높은 경우(4)의 4단계로 구분하고 2단계와 3단계의 경우에는 실내 진동시험의 수행을 통해 추가적인 평가를 수행하는 것으로 기준 (PHRI, 1997)에서 정하고 있다. 또한, 일본 도로교 및 철도 내진설계에서는 실내진동시험의 결과를 토대로 액상화 평가법을 제안한 Iwasaki et al.(1978)의 내용을 기초로 하여 액상화 평가를 수행하도록 되어 있다. 특히, 일본의 지반동역학분야 연구를 이끌어 온 Ishihara(Ishihara and Yasuda, 1972; Ishihara and Yasuda, 1975)의 경우에도 진동비틀림전단시험을 통해 연구결과를 도출한 바 있으며 일본의 유효응력해석법 개발에 많은 영향을 끼치고 있는 Iai et al.(1992)의 연구결과를 보면, 진동비틀림전단시험을 통해 소성일과 과잉간극수압이 연계된다는 유효응력 해석모델을 제안하고 실험결과와 수치해석 결과를 비교 검토한 바 있다. 이와 같은 유효응력 해석법 개발의 경우, 실내진동시험의 수행을 통해 입력파라미터를 산정하거나 수치해석과의 비교를 위해 실내진동시험을 수행하는 것은 필수적이다. 예를 들어, 이 분야의 대표적인 연구자인 Finn교수의 유효응력 해석모델(Martin et al., 1975)은 진동전단시험을 이용하여 건조 시의 동적 체적변형이 포화시 비배수 상태의 동적 과잉간극수압과 상관관계에 있다는 사실을 밝혔으며 소성일의 개념을 누적소성 변형으로 대치한 교란상태개념, DSC (disturbed state concept)을 제안한 Desai(2000)의 경우, 실삼축시험을 통해 자신의 이론(Park, 1997)을 검증한 바 있다.

이상과 같이 지반동역학 분야에서 실내진동시험은 지난 40여 년 동안 간극수와 토립자로 구성된 지반의 동적 거동을 규명하는데 이용되어 왔으며 현재도 액상화 발생, 지진시 지반의 침하 등 다양한 지진시 지반파해를 규명하는데 이용되고 있다. 다만, 시설물 모형을 포함하는 진동대시험이나 원심모형시험에서는 실지진하중을 사용하는 경우가 많은 반면, 지반 교유의 동적특성 파악이 주목적인 실내진동시험에 있어서는 정현하중을 이용하여 지진을 모사하는 것이 일반적이다. 이러한 정현하중의 이용은 불규칙한 진폭을 갖는 지진하중을 정현하중화하는 내용을 포함한 등가전단응력개념 (Seed and Idriss, 1971)의 제안 이후, 이를 토대로 액상화 평가 및 다양한 지반동역학 이론(Seed and Lee, 1966; Seed and Idriss, 1971; Seed et al., 1975; Seed et al., 1976; Seed, 1979)이 제안되고 현재까지도 이를 토대로 한 연구가 진행되고 있을 뿐만 아니라 가장 이용 빈도가 높은 진동삼축시험에 대한 연구(Silver et al.,

1976; Townsend, 1978)도 수행된 바 있다. 최근, 압력재하기기의 대형화와 각종 센서의 발전 등이 함께 하며 실지진하중 재하시의 진동대시험이나 원심모형시험의 수행이 지반동역학 연구에서 크게 주목받고 있으나, 여전히 정현하중을 이용한 실내진동시험의 수행은 내진설계 및 내진해석 시에 이용 빈도가 매우 높은 실정이다.

이러한 가운데, 국내 연구진이 실내진동시험을 통해 정현하중과 실지진하중이 일으키는 지반 내 동적거동이 다소 차이가 있다는 연구결과를 발표하기 시작하였다. Sim(2002)은 국내 설계 지진규모 6.5가 액상화 평가에서 어떠한 영향을 미치는가를 실험적으로 검증한 바 있다. 이때, 8개의 국의 지진기록을 토대로 실지진하중 재하의 진동삼축시험을 수행하고 각 실험에서 액상화를 유발하는 축차응력의 크기를 비교함으로써 지진규모 6.5 사용의 적절성을 연구한 바 있다. 또한, Park(2003)은 추가로 16개의 국의 지진기록을 이용하여 실지진하중 재하의 진동삼축시험을 수행하고 그 결과를 토대로 국내 액상화 평가 시 설계지진규모 6.5에 대한 지진규모 수정계수(magnitude scaling factor)를 1.4로 제안하였으며 Youd et al.(2001)이 1998년 미국 학술대회를 통해 논의된 지진규모 수정계수(magnitude scaling factor)와 비교하여 그 타당성을 검토한 바 있다. 그리고, 후속된 연구를 통해 Hwang(2005)은 16개의 실지진하중 시험결과로부터 산정된 유효응력 매개변수인 소성일, 누적소성변형, 그리고 응력경로 상에서의 상태변환선(phase change line)이 정현하중 재하의 시험결과로부터 산정된 값과 다소 차이를 나타냄을 밝힌 바 있으며 Choi et al.(2007)은 이에 대한 상세분석을 통해 정현하중 재하시와 실지진하중 재하시의 지반 내 과잉간극수압 변화가 큰 차이를 보이는 점으로부터 정현하중을 이용하여 실지진하중을 모사하려는 연구방법에 모순이 있는 점을 밝혔다. 이러한 연구동향은 최근 미국 학술대회에서도 나타난 바 있는데 2018년 LA에서 거행된 미국 지진공학학술대회에서는 정현하중의 조합에 대한 실험연구(Kwan and Huaz, 2018)가 발표된 바 있다.

이 연구에서는 실내진동시험에서 정현하중을 대신할 하중모델을 제안하고자 한다. 이를 위해 기존의 문헌자료에 대한 분석을 통해 정현하중과 실지진하중 재하시의 과잉간극수압이 어떠한 차이를 보이는지를 밝힌 후, 크기를 달리한 정현하중을 조합하여 실지진하중 재하시와 유사한 지반 내 과잉간극수압의 거동이 발현되는지를 검토하고자 한다. 또한, 제안된 조합형 정현하중에 대한 진동대시험을 수행하고 이를 유효응력해석에 기초한 수치해석을 수행하여 그 타당성 여부의 검토도 병행하고자 한다.

## 2. 정현하중과 실지진하중 하에서의 지반거동 변화

정현하중과 실지진하중 간의 비교연구는 국내에서 수행된 Sim(2002)과 Park(2003)의 연구가 대표적이며 액상화를 유발하

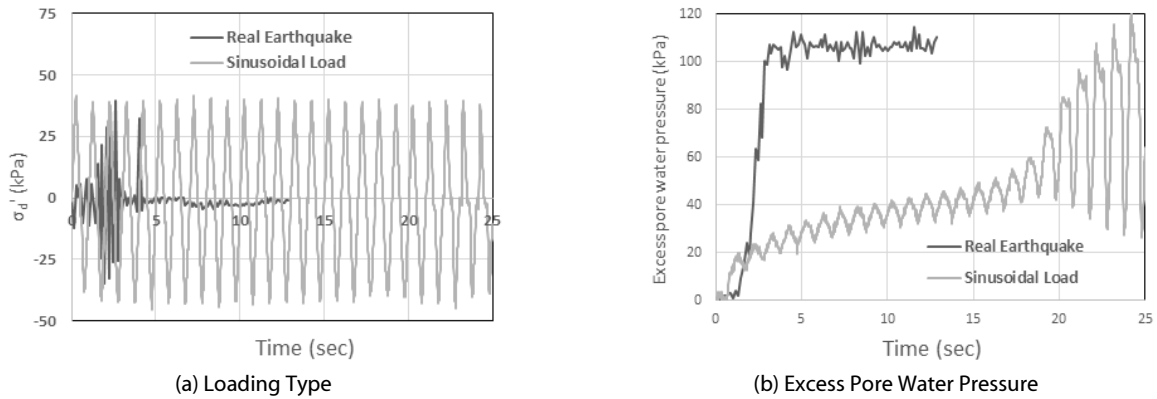


Fig. 1. Comparison of the Excess P.W.P according to the Loading Type

는 주원인 과잉간극수압에 대한 결과들이 다음과 같은 거동을 나타낸 것이 특징이다.

Fig. 1의 실험은 상대밀도 60 %의 주문진 표준사에 대해 유효구속압 100 kPa의 조건으로 실험한 것으로 정현하중 재하시의 주기는 1 Hz이다. 결과에 나타난 바와 같이 정현하중과 실지진하중 모두 유사한 수준의 축차응력이 재하되었음에도 불구하고 18회 재하시 점차 액상화 상태로 전환되는 경향을 나타내었으며 실지진하중의 경우, 1~3초 부근에서 1 Hz보다 더 짧은 주기로 실지진하중이 집중되며 최대진폭이 발생하는 시점에서 초기 액상화가 발생한 것으로 나타났다. 따라서, 정현하중 하에서의 지반 내 동적거동은 실제 지진하에서의 지반 내 동적거동과는 다소 차이가 남을 알 수 있었다. 특히, 위 시험결과에서 나타난 바와 같이 실제 지진하중 하에서의 액상화 거동이 정현하중 재하시보다 그 발생시점이 더 빠르다는 점은 정현하중을 이용한 지반의 동적거동 예측이 실제 지진발생시의 거동양상보다 과소평가될 수 있다는 점을 내포하고 있어 지진시 안전성 확보문제와 연관되어 이에 대한 보완연구가 필요한 실정이다.

이러한 점을 고려하여 이 연구에서는 내진설계에 이용되는 실내 진동시험 수행 시 정현하중을 대신할 조합형 정현하중을 제안하고 그 적절성과 타당성을 검토하고자 한다. 적절성 검토는 먼저 진폭의 크기를 달리한 조합형 정현하중의 형태를 제안하고 선행되는 정현하중의 초기진동재하횟수를 검토하였으며 이를 통해 선정된 조합형 정현하중과 정현하중과의 차이를 실험적으로 비교 검토하였다. 또한, 선정된 조합형 정현하중의 타당성 검토를 위해 변위를 허용하는 토조에 대한 진동대시험의 수행과 유효응력 해석모델을 이용한 수치해석을 통해 타당성도 추가로 검토하였다.

### 3. 조합형 정현하중의 제안 및 적절성 검토

지진의 세기는 일반적으로 최대 가속도와 진동의 지속시간으로

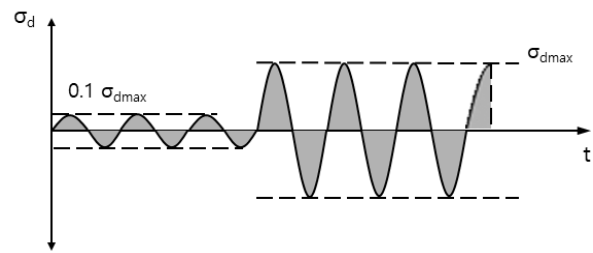


Fig. 2. Shape of Combined Sinusoidal Load

나타낸다. 이러한 점을 고려한 등가전단응력개념(Seed et al., 1975)을 살펴보면, 최대가속도의 2/3를 가진 정현파가 몇 회 재하되었는지를 통해 지진규모를 표현하도록 정의하였다. 이와 같은 고려는 고체 역학적 관점에서 지반을 고려할 때는 합리적일 수 있으나 Fig. 1에 나타난 바와 같이 적은 하중에서도 과잉간극수압의 변화는 크게 발현될 수 있으며 이는 고체와 달리 액체는 적은 하중 하에서 다양한 방향으로 흐름을 가져갈 수 있다는 점을 보여준 실험사례이다.

이 연구에서는 이러한 점을 고려하여 기존의 정현파의 사용을 유지한 채, 2가지 진폭을 가진 정현파를 통해 조합형 정현하중을 다음과 같이 제안하였다.

Fig. 2에서 후행되는 정현하중은 기존의 정현하중과 같은 의미가 있는 것으로 최대전단응력을 등가전단응력으로 환산한 개념을 포함하고 있다. 이에 반해 선행 정현하중은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 지진기록의 최대진폭을 갖는 지진가속도가 발현되기 전의 가속도들을 표현하는 것으로 그 크기를 후행 정현하중이 갖는 최대축차응력의 10 %로 정하였다.

#### 3.1 선행 정현하중의 재하횟수에 대한 결정

Fig. 1의 실지진하중을 보면, 대부분의 경우, 최대가속도가 작용하기 전에는 상대적으로 적은 크기의 가속도가 작용하는 것을

볼 수 있다. 그러나, 지진기록마다 해당하는 지속시간이 다르기 때문에 이 연구에서는 Fig. 2의 조합형 정현하중에 있어서 몇 회의 선행 정현하중을 재하하는 것이 합리적인지를 진동전단실험을 통해 선정하였다. 진동전단실험은 진동대의 가진장치를 이용하여 부피 600 mm × 600 mm × 200 mm의 주문진 표준사로

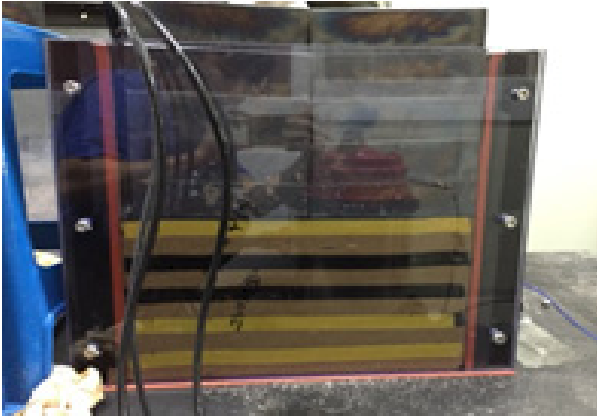
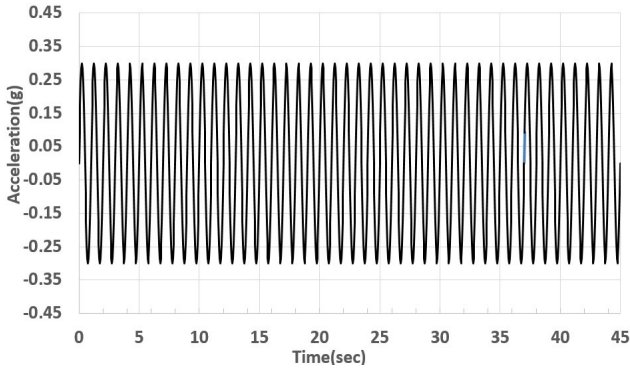


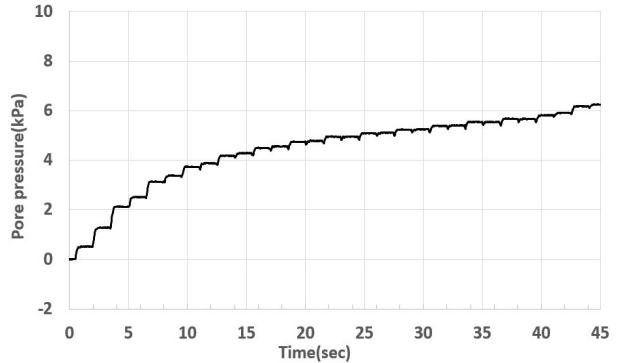
Fig. 3. Soil Container on the Shaking Table

토조 안을 채운 시료 위에 철판을 통해 상재압을 가했으며 선행 정현하중의 재하시간을 0초, 5초, 10초, 15초로 변화 시켜 실험을 수행하고 가속도계와 간극수압센서를 통해 시험 결과를 획득하였다. 이때, 전단을 받는 양끝단에는 반사파의 영향을 감소시킬 50 mm 두께의 스펀지를 삽입하였으며 시험 시 주문진 표준사의 상대밀도는 40 %, 상재압은 10 kPa, 입력가속도는 0.3 g, 재하주기는 1 Hz이다. Fig. 3은 토조의 모습을 나타낸 것이며 각 케이스별 시험결과를 나타내면 Figs. 4~7과 같다.

위 그림들을 비교해 보면, 선행하중을 주지 않은 경우와 5초(5회) 선행하중을 준 경우가 과잉간극수압의 변화거동이 비슷한 것으로 나타났으며 10초(10회)와 15초(15회)의 경우에는 약간의 시간적 차이가 있었으나 Fig. 1에 나타난 것과 같은 급작한 과잉간극수압의 변화가 나타났다. 10초의 선행하중을 재하한 경우에는 10초 이후, 과잉간극수압의 급작한 변화가 나타났으며 15초의 선행하중을 재하한 경우, 10초가 지난 시점부터 눈에 띄는 과잉간극수압의 변화거동이 시작되고 과잉간극수압의 급작한 변화는 15초 이후에 나타난 점을 고려하여 선행 정현하중의 재하횟수를 10회로 정하였다.

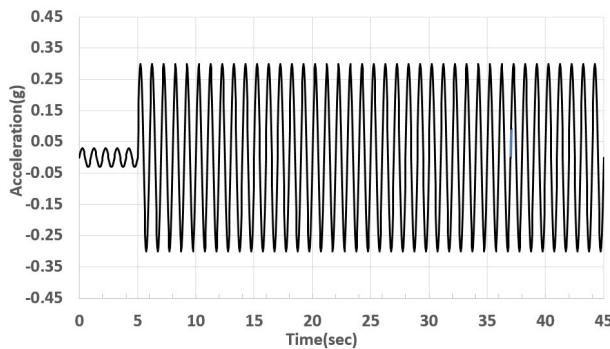


(a) Loading Type

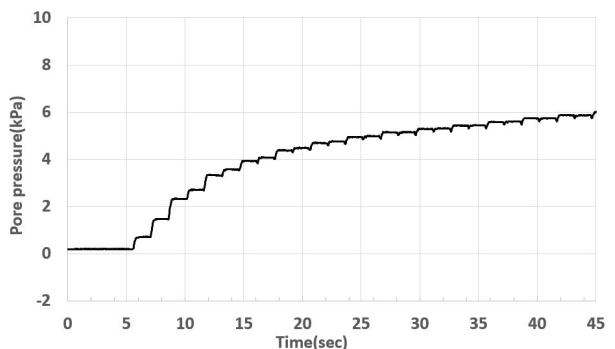


(b) Excess Pore Water Pressure

Fig. 4. Cyclic Shear Test using Shaking Table (Preceding Vibration 0 sec)

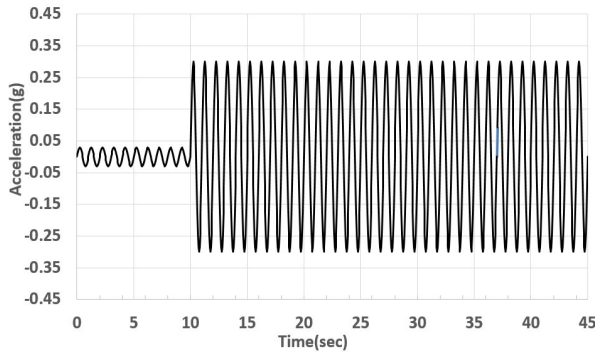


(a) Loading Type

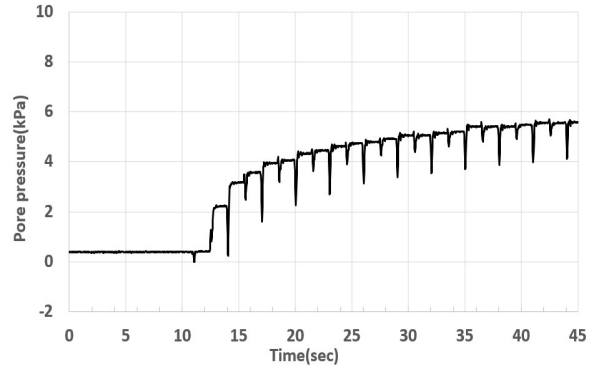


(b) Excess Pore Water Pressure

Fig. 5. Cyclic Shear Test using Shaking Table (Preceding Vibration 5 sec)

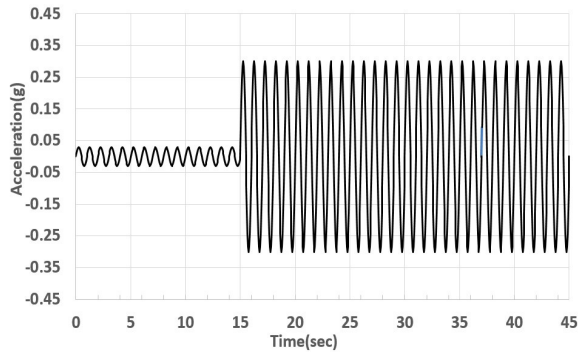


(a) Loading Type

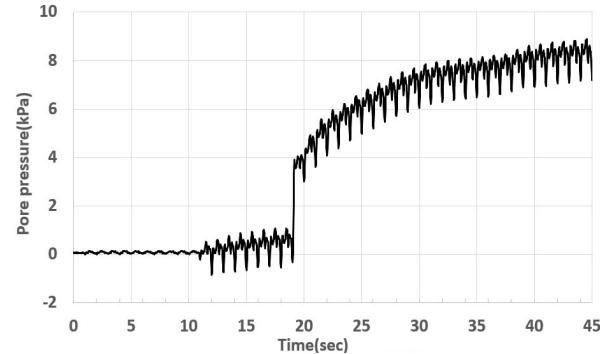


(b) Excess Pore Water Pressure

Fig. 6. Cyclic Shear Test using Shaking Table (Preceding Vibration 10 sec)

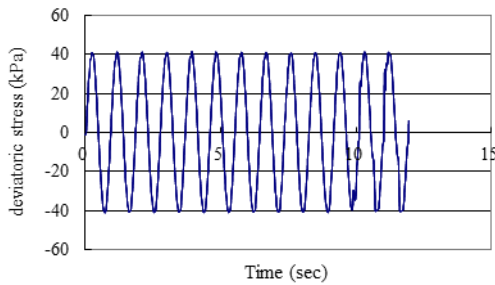


(a) Loading Type

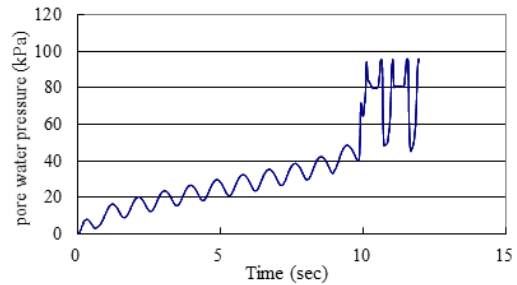


(b) Excess Pore Water Pressure

Fig. 7. Cyclic Shear Test using Shaking Table (Preceding Vibration 15 sec)



(a) Loading Type



(b) Excess Pore Water Pressure

Fig. 8. Cyclic Triaxial Test (Sinusoidal Loads)

### 3.2 진동삼축시험을 통한 적절성 검토

이 연구에서는 실내진동시험에서 기존의 정현하중을 대신할 조합형 정현하중을 제안하는 것으로 Fig. 3과 같은 시험과 같은 조건인 상대밀도 40 % 주문진 표준사를 이용하여 유효구속압만 100 kPa로 변화시키고 가속도가 아닌 축차응력 40 kPa를 재하하여 액상화 발생을 위한 진동삼축시험을 수행하였다. 진동삼축시험은 상대밀도 40 %의 주문진표준사를 대상으로 기존의 정현하중을

재하한 시험과 선행 정현하중 10회를 포함한 조합형 정현하중을 재하한 시험으로 구분하여 수행하였다. 각각의 시험결과는 다음과 같다.

Figs. 8 and 9를 비교해 보면, 정현하중 재하시의 경우, Figs. 1 and 4와 같은 경향을 나타낸 반면, 조합형 정현하중은 Figs. 6 and 7에서 나타난 바와 같이 선행 정현하중이 끝난 후, 후행 정현하중이 재하되는 순간, 급격한 과잉간극수압의 증가가 나타났

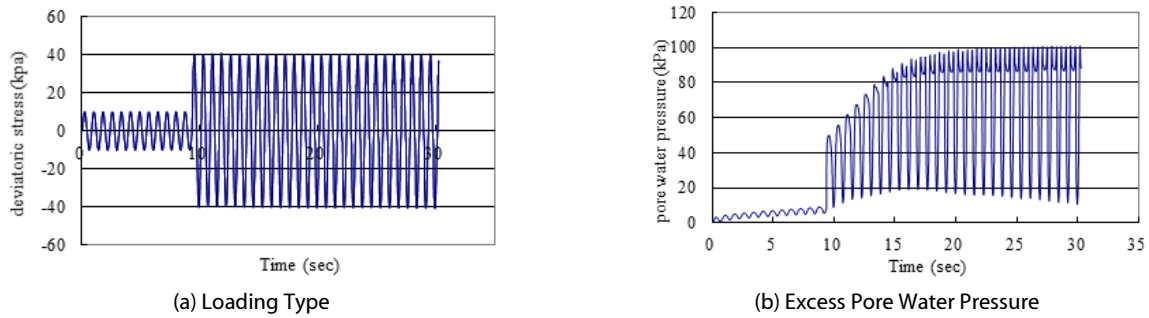


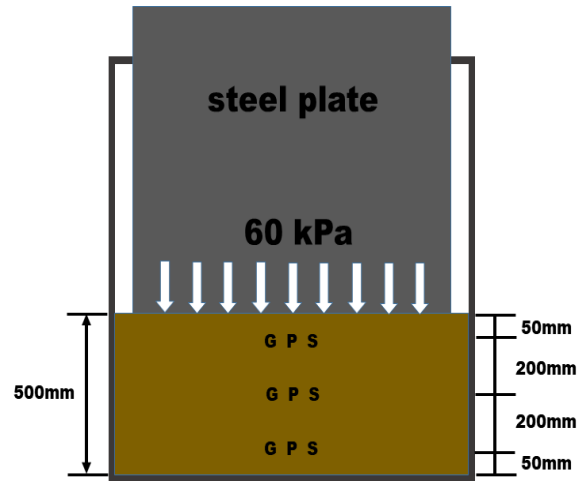
Fig. 9. Cyclic Triaxial Test (Combined Sinusoidal Loading)

Table 1. Condition for Shaking Table Test

Vertical effective stress (kPa)	60	Loading type	Combined sinusoidal load (0.008 g + 0.08 g)
Dr (%)	40	Sample condition	Saturated, undrained
Frequency (Hz)	1	Loading control	Stress control



(a) Lamina Box on the Shaking Table



(b) Sensor Position

Fig. 10. Shaking Table Test in Busan Univ. Earthquake Engineering Research Center

다. 이러한 결과는 Fig. 1의 실지진하중 재하시의 급격한 과잉간극수압의 증가를 정현하중 재하시보다는 잘 모사하는 것으로 나타나 이를 이용한 실내진동시험이 향후에는 보다 실지진하중의 영향을 잘 반영할 것으로 판단된다.

#### 4. 진동대시험과 유효응력해석을 통한 타당성 검토

실내진동시험의 결과에 대한 타당성 검토를 위해 Table 1과 같은 조건으로 유효상재압이 가해진 진동대시험을 수행하였다.

진동대 시험은 부산대 지진연구센터의 라미널박스(1.92 m × 1.12 m × 1.8 m)를 이용하여 수행하였으며 전체적인 진동대시험의 모습과 흙 내부에 설치한 센서의 모습을 나타내면 Fig. 10과 같다.

이때, 상재하중 재하를 위한 철판의 거치를 위해 토조 내 흙의 높이는 0.5 m로 하였으며 센서는 가속도계(G), 간극수압계(P), 토압계(S)를 설치하였다.

이상의 조건으로 진동대시험을 수행한 결과, 가장 동적신호가 이상적으로 나온 중앙부의 결과를 나타내면 다음과 같다.

Fig. 11을 보면, 조합형 정현하중의 선행 정현하중이 끝나고 후행 정현하중이 작용하는 시점에서 급작한 정현하중의 증가가 나타났으며 이는 Fig. 9의 조합형 정현하중 재하시의 진동삼축시험 결과와 매우 유사함을 볼 수 있다. 이로부터 이 연구를 통해 제안된 조합형 정현하중은 기존의 정현하중보다 실지진하중 재하시의 지반 내 과잉간극수압의 변화를 잘 모사하는 것으로 나타났다. 이상의 결과들로부터 이 연구에서 제안된 조합형 정현하중은 기존의 정현

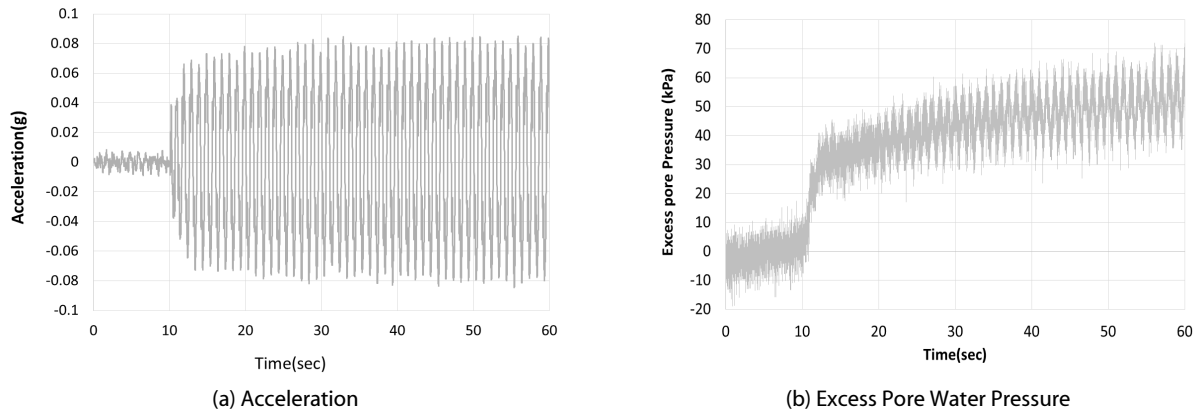


Fig. 11. Results from Shaking Table Test (Combined Sinusoidal Load)

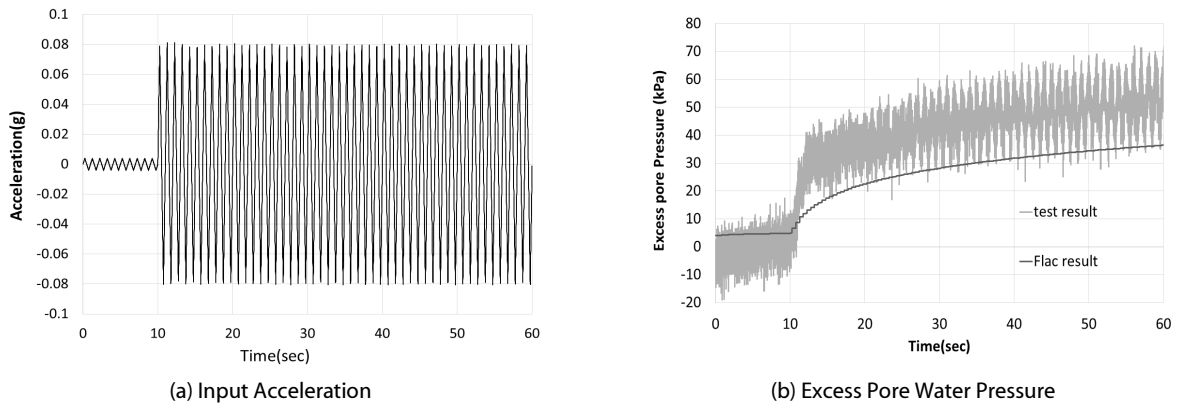


Fig. 12. Results for Numerical Simulation on Shaking Table Test

하중보다 실지진하중을 잘 모사하는 것으로 나타나 이를 토대로 기존의 제안된 연구결과들을 보완한다면 지진하중 하에서의 지반의 동적 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 이 연구에서는 진동대시험을 시뮬레이션하기 위해 유효응력 해석모델인 Finn모델을 이용하여 수치해석을 수행하였으며 이때, 이용된 범용프로그램은 Finn모델이 탑재된 FLAC 프로그램이다. Finn모델의 경우, 4개의 입력변수는 진동전단시험을 통해 직접 산정하게 되어 있지만, 이후 계속된 연구(Byrne, 1991)를 통해 표준관입 시험의 결과인 N값을 이용하여 2개로 축소된 입력변수를 산정하는 내용이 프로그램에 포함되었다. 이 연구에서는 상대밀도 40%를  $N=5$ 로 고려하여 2개 입력변수를 산정하고 해석을 수행하였다. 또한, 수치해석에 있어서 경계면은 모두 비배수조건을 적용하였으며 양쪽 경계면에는 진동을 흡수할 수 있는 경계조건을 적용하고 상부에 철재로 인한 상재압 60 kPa을 재하하였다. 그리고, 입력하중으로 해석요소망의 하단에 조합 정현하중을 재하하였다. 수치해석 결과, 해석요소망의 중앙부 해석결과와 실제 진동대 시험에서 획득한 가속도계와 간극수압계의 결과를 비교하여 나타내면 다음과 같다.

Fig. 12에 나타난 바와 같이 수치해석 결과와 실제 조합형 정현하중에 대한 진동대 시험결과를 비교해 보면, 수치해석의 결과가 과잉간극수압의 변화거동을 유사하게 모사하고 있는 것으로 나타났다. 다만, 정량적으로 선행 정현하중이 재하시와 후행 정현하중 재하시 모두 전반적으로 실험결과보다 적은 변화를 나타내었으며 후행 정현하중 재하시 점진적으로 과잉간극수압이 증가하여 실제 실험과는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 수치해석에 이용된 Finn모델의 유효응력 파라미터들이 정현하중을 이용한 실험결과로부터 선정되도록 고안된 점에 기인한 것으로 향후 조합형 정현하중의 사용성 증대를 위해서는 유효응력해석법의 개발에서도 많은 보완이 필요한 것으로 판단된다.

### 5. 결론

이 연구에서는 실지진하중을 모사할 수 있는 조합형 정현하중을 제안하고 진동전단시험과 진동삼축시험을 통해 그 적절성을 검토하고 진동대시험과 유효응력해석에 기초한 수치해석을 통해 타당

성을 검토하였다. 이 연구에서 제안된 조합형 정현하중은 2개의 정현하중이 조합된 것으로 선행 정현하중의 최대진폭은 후행 정현하중의 최대진폭 대비 10 % 수준으로 정하였으며 이는 일반적인 실지진기록을 보면, 최대진폭 전에 상대적으로 작은 가속도가 수 초간 기록된 것을 반영한 것이다. 실지진하중에 대한 모사가 적절한지 여부는 기존의 실지진하중에 대한 실험결과에서 나타난 현상인 과잉간극수압의 급작한 증가를 제안된 조합형 정현하중이 정현하중보다 더 잘 모사할 수 있는가를 비교 검토하는 것으로 연구결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 선행 정현하중의 재하횟수 선정을 위해 재하횟수를 0, 5, 10, 15회로 구분하여 진동전단시험을 수행한 결과, 10회 및 15회의 경우, 급작한 과잉간극수압의 거동을 보이는 것으로 나타났으며 눈에 띄는 과잉간극수압의 변화가 10회 이후에 나타나는 점을 고려하여 조합형 정현하중에서 선행 정현하중의 재하횟수는 10회로 하였다.
- (2) 유효구속압 100 kPa의 진동삼축시험에서 정현하중과 선행 정현하중 10회의 조합형 정현하중을 각각 재하한 시험결과, 조합형 정현하중은 실지진하중에서 급작하게 과잉간극수압이 증가하는 현상이 후행 정현하중 재하시에 나타난 반면, 기존의 정현하중 시험의 경우에는 처음에는 점진적인 증가형태를 보이다 액상화 상태로 전환되는 급작한 거동변화를 나타내었다.
- (3) 상재압 60 kPa 상태에서 조합형 정현하중을 재하한 진동대시험결과, 진동삼축시험과 같이 후행의 정현하중 재하시 급작한 과잉간극수압의 변화가 나타났으며 이에 대한 유효응력개념의 수치해석결과에서도 유사한 거동을 보였다. 다만, 정량적으로 수치해석결과가 진동대시험결과와 차이를 보이는 점으로부터 향후 이를 잘 모사할 수 있는 해석법의 개발이 필요할 것으로 판단되며, 특히, 이러한 해석법 개발 연구에서 조합형 정현하중에 대한 실내진동시험을 이용하게 되면, 실지진하중 하에서의 지반거동을보다 신뢰성있게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 이 연구에서 수행된 실험시료의 상태가 상대밀도 40 %의 주문진 표준사인 점을 고려하여 추가적으로 보다 많은 조건 하에서 조합형 정현하중의 적절성이 검토된다면 향후, 기존의 정현하중을 대신하는 액상화 평가법이나 유효응력해석모델의 개발이 후속되어 지진하중을 받는 지반의 동적거동 변화를 좀 더 신뢰성 높게 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(첨단항만물류기술개발사업-항만 및 여항 설계기준 고도화를 위한 성능기반 내진설계 기술 개발).

### References

Byrne, P. M. (1991). "A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand." *In Proceedings: Second International conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (St. Louis, Missouri, March, 1991), Paper No. 1.24, pp. 47-55.

Choi, J. S., Jang, S. Y. and Kim, S. I. (2007), "Detailed investigation on the dynamic excess pore water pressure through liquefaction tests using various dynamic loadings." *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 11, No. 2, pp. 81-94.

Desai, C. S. (2000). "Evaluation of liquefaction using disturbed state and energy approaches." *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 7, pp. 618-631.

Hwang, S. J. (2005). *An experimental study on the liquefaction behavior under various loading condition*, Masters dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.

Iai, S., Matsunaga, Y. and Kaneoka, T. (1992). "Strain space plasticity model for cyclic mobility." *Soil and Foundation*, JSSMFE, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15.

Ishihara, K. and Yasuda, S. (1972). "Sand liquefaction due to irregular excitation." *Soil and Foundations*, Vol. 12, No. 4, pp. 65-77.

Ishihara, K. and Yasuda, S. (1975). "Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation." *Soil and Foundations*, Vol. 15, No. 1, pp. 45-59.

Iwasaki, T., Tatuoka, F., Tokida, K. and Yasuda, S. (1978). "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various Sites in Japan." *Proceedings of 5th Japan Earthquake Symposium*, pp. 641-648.

Kwan, W. S and Huaz, J. (2018). "Effects of irregular loading on sand responses before and after liquefaction initiation." *Proceeding of the 11th NCEE, Earthquake Engineering Research Institute*, LA, CA.

Martin, G. R., Finn, W. D. and Seed, H. B. (1975). "Fundamentals of liquefaction under cyclic loading." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 101, No. GT5, pp. 423-438.

Park, I. J. (1997). *Disturbed state modelling for dynamic and liquefaction analysis*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Univ. of Arizona, Tuscon, Arizona.

Park, S. Y. (2003). *An experimental study on the liquefaction resistance strength using real earthquake loadings considering seismic magnitude in moderate earthquake region*, Masters dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.

Port and Harbour Research Institute (PHRI) (1997). *Handbook on liquefaction remediation of reclaimed land*, A. A. Balkema, Amsterdam.

Seed, H. B. (1979). "Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes." *Journal of the*



- Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No. GT2, pp. 83-108.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential." *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp. 1248-1272.
- Seed, H. B. and Lee, K. L. (1966). "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105-134.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., Makdisi, F. and Bamerjee, N. (1975). *Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analysis*, Report No. EERC 75-29, UCB.
- Seed, H. B., Martin, P. O. and Lysmer, J. (1976). *The generation and dissipation of pore water pressure during soil liquefaction*, Report No. EERC 75-26, Earthquake Engineering Research Institute, University of California, Berkeley, California.
- Silver, M. L., Chan, C. K., Ladd, R. S., Lee, K. L., Tiedemann, D. A., Townsend, F. C., Valera, J. E. and Wilson, J. H. (1976). "Cyclic triaxial strength of standard test sand." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 102, No. GT5, pp. 511-523.
- Sim, J. W. (2002). *An experimental study for estimation of the liquefaction resistance strength of saturated sand using real earthquake loading*, Masters dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Townsend, F. C. (1978). *A review of factors affecting cyclic triaxial tests*, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 356-383.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B. and Stokoe II, K. H. (2001). "Liquefaction resistance of soils : Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 127, No. 10, pp. 817-833.