

## 실지진하중을 이용한 중진지역에서의 액상화 저항강도에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Liquefaction Resistance Strength Using Real Earthquake Loadings Considering Seismic Magnitude in Moderate Earthquake Region

김수일<sup>1)</sup>, Soo-Il Kim, 최재순<sup>2)</sup>, Jae-Soon Choi, 박성용<sup>3)</sup>, Seong-Yong Park,  
박근보<sup>4)</sup>, Keun-Bo Park, 심재욱<sup>5)</sup>, Jae-Uk Sim

<sup>1)</sup> 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>2)</sup> 연세대학교 토목공학과 박사 후 과정, Post Doc., Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>3)</sup> 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>4)</sup> 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>5)</sup> 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

**개요(SYNOPSIS)** : Based on the equivalent uniform stress concept presented by Seed and Idriss, sinusoidal cyclic loads which simplified earthquake loads have been applied in evaluating the liquefaction resistance strength experimentally. However, the liquefaction resistance strength of soil based on the equivalent uniform stress concept can not exactly reflect the dynamic characteristics of the irregular earthquake motion. The liquefaction assessment method which was invented by using the equivalent uniform stress concept is suitable for the severe earthquake region such as Japan or USA, so the proper method to Korea is needed. In this study, estimation of the resistance to liquefaction was conducted by applying real earthquake loading to the cyclic triaxial test. From the test results, the characteristics of the fine sand under moderate earthquake were analyzed and compared with the results under strong earthquakes. Typically real earthquake loads used in this study are divided into two types - impact type and vibration type. Furthermore, results of the liquefaction resistance strength based on the equivalent uniform stress concept and the concept using real earthquake loading were compared.

**주요어(Key Words)** : liquefaction, earthquake loading, cyclic triaxial test, equivalent uniform stress concept, liquefaction resistance strength, magnitude, impact type, vibration type

### 1. 서론

지반의 액상화 저항강도를 산정하기 위한 실내시험 수행시 대부분의 경우는 실지진력을 이용하기보다는 Seed와 Idriss(1975)가 제안한 등가전단응력 개념에 기초하여 지진이 발생시키는 최대전단응력의 65%를 최대진폭으로 한 정현하중을 반복 재하하여 사용하고 있으나 이는 실제 지반내의 불규칙한 지진력과는 상대적인 차이가 있다. 또한 등가전단응력 개념에 의해 개발된 액상화 평가 방법은 미국이나 일본 같은 강진 지역에 적합한 방법으로 우리나라와 같은 중진 지역에 적합한 액상화 평가방법이 필요하다.

본 연구에서는 지진과 같은 불규칙한 동하중이 작용할 때 포화 사질토의 거동 특성을 연구하기 위하여

주문진 표준사를 대상 시료로 선택하였으며, 지진규모 6.5 근처의 실지진 가속도 이력을 입력하중으로 사용하였다. 이 때 지진파를 충격형과 진동형의 두 가지 형태로 분류하여 실험을 수행하여 지진파 형태가 포화 사질토의 액상화 저항강도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 지진규모 7 이상의 강진규모 실지진 가속도 이력을 입력하중으로 사용하여 중진규모의 실험결과와 비교, 분석하였으며, 등가전단응력 개념에 기초한 정현파를 이용한 진동삼축시험을 수행하여 실지진파를 이용한 실험결과와 비교, 분석하였다.

## 2. 액상화저항강도

### 2.1 등가전단응력개념에 의한 액상화 저항강도의 산정

지진 발생시 실제 지반에 발생하는 응력은 다양한 크기를 가지는 불규칙한 응력이며 이러한 불규칙한 지진하중을 일정한 진동전단응력으로 나타내는 것이 등가전단응력 개념이다. 일반적으로 지반의 지진에 대한 전단저항력을 산정하기 위해 임의의 지반심도를 나타내는 구속압에 대해 이러한 등가전단응력 개념에 기초한 액상화를 발생시키는 다양한 반복변형 또는 반복응력의 실내시험을 수행한다. Seed(1971)는 지진으로 인해 발생하는 전단응력은 불규칙한 반면 진동삼축시험에서 사용하는 축하중은 정현파이므로 현상상태를 나타내기 위해 많은 보정을 실시하며, 불규칙한 전단응력을 정현파로 환산할 때 보정계수를 0.65로 제시하였다. 또한 Ishihara와 Yasuda(1975)는 불규칙한 하중을 적용한 비틀림전단시험을 수행하여 지진파형에 따른 보정계수를 충격형 지진파의 경우 0.55, 진동형 지진파의 경우 0.70을 제시하였다. 충격형 지진파는 최대전단응력 이전에 최대전단응력의 60% 이상 되는 크기의 전단응력이 2회 이하 있는 지진파를, 진동형 지진파는 최대전단응력 이전에 최대전단응력의 60% 이상 되는 크기의 전단응력이 3회 이상 있는 지진파를 의미한다.

그러나 이러한 등가전단응력 개념에 의한 액상화 저항강도의 실험적 산정은 실험방법의 간편성과 적용의 편리함으로 인해 일반적으로 사용되고 있지만 지진규모나 지속시간, 지진파 형태 등 지진파가 갖고 있는 특성을 반영하지 못하고 있기에 지진 발생시 지반의 동적거동을 파악할 수 없다는 단점이 있다.

### 2.2 등가반복재하횟수의 산정

Seed와 Idriss(1975)는 지진으로 인해 발생하는 불규칙한 전단응력을  $0.65\tau_{max}$  를 기준으로 환산하여 이에 따른 등가반복재하횟수를 산정하였다. 그림 1은 실험을 통하여 산정한 임의의 응력에 대한  $0.65\tau_{max}$ 에서의 등가반복재하횟수를 나타내는 것이다. 그림 1을 표로 나타내면 표 1과 같고 실제 지진가속도 기록으로부터 등가반복재하횟수를 산정할 수 있다. Seed와 Idriss는 많은 지진가속도 기록을 수집하여 지진규모에 따른 등가반복재하횟수를 산정하여 그림 2에 나타내었다.

## 3. 진동삼축시험

### 3.1 진동삼축시험기의 구성

본 연구에서 사용된 시험기는 영국의 ELE사가 개발한 진동삼축시험기이다. 이 장비는 사용자가 임의의 진동하중을 작성하여 적용할 수 있고 70Hz의 높은 진동수까지 재하가 가능하여 실제 지진하중을 충분히 구현할 수 있는 장비이다. 시험기는 압력, 변위, 체적변화, 축하중 및 간극수압 등의 자료값을 변환기(transducer)로 측정하여 컴퓨터로 자동 저장시키고 얻어진 자료값에 따라 다시 컴퓨터에 압력을 조절하여 축압과 축차응력을 제어하는 부분, 즉 제어 및 데이터 획득 시스템(Control and data acquisition system)과 실제로 시험이 실시되는 실행부분으로 구성되어 있다. 본 진동삼축시험기는 모든 제어를 컴퓨터로 수행하며, 결과를 자동으로 저장하는 자동화시스템이다.

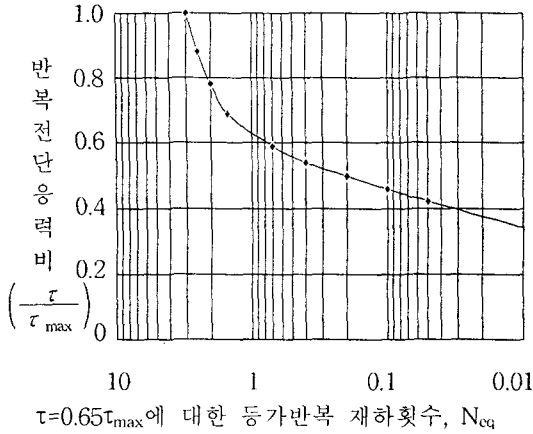


그림 1. 임의의 응력에 대한  $0.65\tau_{max}$ 에서의 등가반복재하횟수(Seed와 Idriss, 1975)

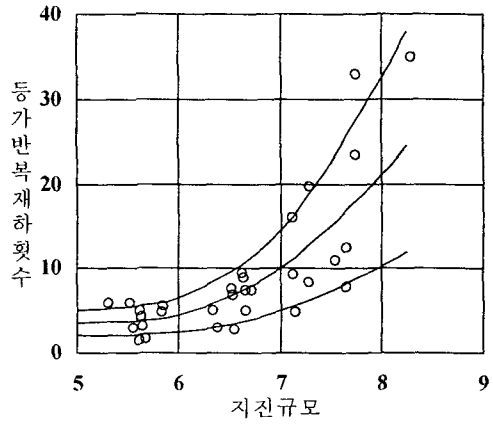


그림 2. 지진기록에 기초한 등가반복 재하횟수(Seed와 Idriss, 1975)

표 1 등가전단응력에 따른 등가반복재하횟수 (Seed와 Idriss, 1975)

0.65 $\tau_{max}$ 의 등가전단응력 3회에 해당하는 전단응력	등가전단응력에 따른 등가반복 재하횟수
1.0 회@1.0 $\tau_{max}$	1회@1.0 $\tau_{max}$ = 3 회@0.65 $\tau_{max}$
1.1 회@0.95 $\tau_{max}$	1회@0.95 $\tau_{max}$ = 2.7 회@0.65 $\tau_{max}$
1.25 회@0.9 $\tau_{max}$	1회@0.9 $\tau_{max}$ = 2.4 회@0.65 $\tau_{max}$
1.45 회@0.85 $\tau_{max}$	1회@0.85 $\tau_{max}$ = 2.05회@0.65 $\tau_{max}$
1.75 회@0.8 $\tau_{max}$	1회@0.8 $\tau_{max}$ = 1.7 회@0.65 $\tau_{max}$
2.1 회@0.75 $\tau_{max}$	1회@0.75 $\tau_{max}$ = 1.4 회@0.65 $\tau_{max}$
2.5 회@0.7 $\tau_{max}$	1회@0.7 $\tau_{max}$ = 1.2 회@0.65 $\tau_{max}$
3.0 회@0.65 $\tau_{max}$	1회@0.65 $\tau_{max}$ = 1.0 회@0.65 $\tau_{max}$
4.4 회@0.6 $\tau_{max}$	1회@0.6 $\tau_{max}$ = 0.7 회@0.65 $\tau_{max}$
8.0 회@0.55 $\tau_{max}$	1회@0.55 $\tau_{max}$ = 0.4 회@0.65 $\tau_{max}$
14.0 회@0.5 $\tau_{max}$	1회@0.5 $\tau_{max}$ = 0.2 회@0.65 $\tau_{max}$
29.0 회@0.45 $\tau_{max}$	1회@0.45 $\tau_{max}$ = 0.1 회@0.65 $\tau_{max}$
90.0 회@0.4 $\tau_{max}$	1회@0.4 $\tau_{max}$ = 0.04회@0.65 $\tau_{max}$
160.0회@0.35 $\tau_{max}$	1회@0.35 $\tau_{max}$ = 0.02회@0.65 $\tau_{max}$

### 3.2 기본물성 시험

#### 3.2.1 상대밀도 시험

사질토 지반의 비배수 거동특성은 입자의 조밀한 정도 즉, 상대밀도에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 지반의 상대밀도를 재현하기 위해서는 가장 느슨한 상태와 가장 조밀한 상태의 건조단위중량을 알아야 한다. 본 연구에서는 주문진 표준사를 이용하여 현장의 상대밀도를 재현하기 위해서 주문진 표준사의 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량을 산정하였다. 시험을 통해 산정된 결과는 표 2에 나타내었다.

표 2. 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량

최소건조단위중량 $\gamma_{dmin}(g/cm^3)$	최대건조단위중량 $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$
1.39	1.60

#### 3.2.2 입도분포 시험

과거 액상화 발생자료를 근거로 작성된 입도분포에 따른 액상화 가능성 영역에 주문진 표준사의 입도 분포를 나타낸 결과 그림 3에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 입도분포는 입자가 균질한 빈입도이며, 액상화가 발생하기 쉬운 영역에 있다. 그림 3 중 액상화 발생가능성과 관련된 한계선들은 Ishihara(1997)

가 제안한 범위이다.

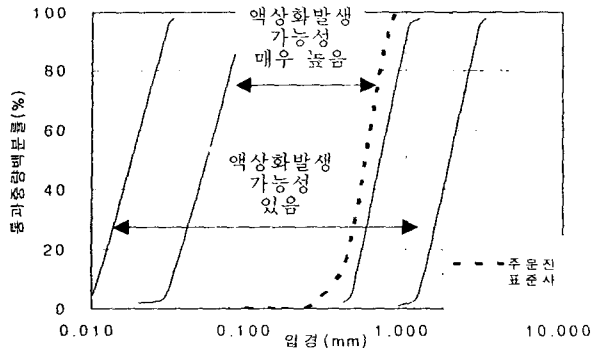


그림 3. 주문진 표준사의 입도분포 곡선

표 3. 진동삼축시험의 제반조건

종류	시험 조건
하중종류	실지진파형(충격형8, 진동형8), 정현파
제어방식	응력제어방식
시료조건	포화, 비배수
시료성형방법	수중침강법

### 3.3 진동삼축시험 조건

본 연구에서 수행된 진동삼축시험의 제반조건은 표 3과 같다. 실내시험시 액상화가 발생하기 쉬운 현상 상태를 재현하기 위해서 주문진 표준사를 대상으로 초기 상대밀도를 60%, 초기유효구속압을 100kPa로 정하였다. 시료 성형방법은 수중에서 시료를 침강시켜 시료를 성형하는 수중침강법을 사용하였다. 축하중은 과거 역사지진의 가속도 시간이력을 실험기에 맞게 변환하여 입력시킨 실지진파를 응력제어방식으로 재하하였다.

### 3.4 입력하중

본 실험에서는 우리나라에서 발생한 적절한 지진기록이 없는 관계로 국외의 과거 역사 지진들의 가속도 시간이력을 입력하중으로 사용하였다. 표 4는 본 실험에 사용한 입력하중이다. 입력하중은 Ishihara(1976)가 제안한 충격형 지진파형과 진동형 지진파형, 두 가지 형태로 분류하였으며, 시험기에 입력 가능하도록 실 지진가속도 기록을 Energy Method(Trifunac와 Brady, 1975)에 의한 유효지속간으로 변환하여 사용하였다.

표 4. 진동삼축시험에 사용된 지진가속도 기록

지진파 (충격형)	지진 규모	유효지속 시간(sec)	지진파 (진동형)	지진 규모	유효지속 시간(sec)
Parkfield	6.1	24	Cass	6.2	10
Ormond	6.2	20	Japan 2001.12.02	6.3	20
Japan 2000.07.30	6.3	15	BajaCalifornia	6.4	18
Bigbear	6.5	22	Coalinga	6.5	20
Tamaranui	6.6	20	Alaska	6.6	13
Ofunato	7.4	14	El-Centro	7.1	24
Costarica	7.5	21	Valpraiso	7.2	13
Hachinohe	7.9	15	Michoacan	8.1	23

### 3.5 실험결과

본 연구에서는 기존의 정현파를 이용한 진동삼축시험 및 지진규모와 지진파 형태의 지진특성 변화가 액상화 저항강도에 미치는 영향을 산정하기 위하여 실지진하중을 이용한 진동삼축시험을 수행하였다.

### 3.5.1 정현파형 진동삼축시험 결과

주문진 표준사를 사용하여 초기상대밀도 60%, 초기유효구속압 100kPa의 조건 하에서 정현파형 진동삼축시험을 수행하였다. 그림 4는 축하중의 크기를 변화시키면서 액상화 발생 재하횟수와 액상화 저항강도의 관계를 나타낸 것이다. 그림 4에서 가로축의 세 점은 등가전단응력 개념을 적용하여 산정한 지진규모 6.0, 6.75, 7.5에 해당하는 등가반복 재하횟수이다. 진동삼축시험과 같은 동적 실내시험을 통해 지반의 액상화 저항강도비를 산정할 때에는 현장상태를 나타내기 위해 많은 보정을 실시한다. 그러나 본 연구에서는 실제 지진으로 인한 불규칙한 전단응력과 일정한 진동전단응력의 비교를 동일한 실험조건에서 수행하므로 이와 같은 보정은 시행하지 않았다.

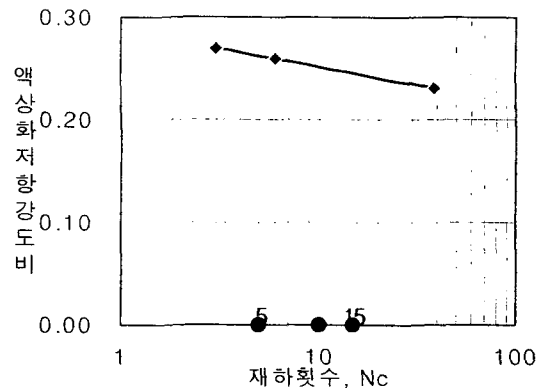


그림 4. 정현파형 시험시 재하횟수에 따른 액상화 저항강도비

### 3.5.2 실지진파형 진동삼축시험결과

본 실험에서는 우리나라에 적합한 지진규모 6.1에서 6.6 범위의 충격형 지진파형 5개와 진동형 지진파형 5개 및 강진규모의 충격형 지진파형 3개와 진동형 지진파형 3개를 선택하여 입력하중으로 작용시켰다. 우선 실지진하중 작용시 최대축차응력과 초기액상화 발생시점의 관계를 찾기 위한 시험을 수행하였다. 먼저 임의의 최대축차응력으로 실험을 수행하여 그 때의 잔류간극수압을 측정한다. 잔류간극수압이 초기유효구속압에 미치지 못할 경우 최대축차응력을 조금씩 증가시켜가며 반복시험을 수행하고 잔류간극수압이 초기유효구속압과 같아질 때의 최대축차응력을 액상화 발생 최대축차응력으로 정의한다. 이와 같은 과정에 따라 지진규모 6.5의 Coalinga 지진파형 실험을 수행한 결과, 지속시간에 따른 축차응력과 잔류간극수압비를 그림 4, 그림 5에 나타내었다.

그림 5는 실험기에 맞게 변환된 하중이며, 액상화가 발생할 때까지 하중을 증가시키면서 실험을 계속 수행한다. 그림 6은 최대축차응력을 26kPa로 했을 때 잔류간극수압이 45kPa, 30kPa의 최대축차응력을 작용시켰을 때 78kPa의 잔류간극수압이 발현되고, 마지막으로 32kPa의 최대축차응력을 작용시킨 결과 과잉간극수압이 100kPa를 넘어서 액상화가 발생한 결과를 함께 도시한 것이다. 이와 같은 과정에 의해 8개의 진동형 지진파형과 8개의 충격형 지진파형에 대한 진동삼축시험 수행시 액상화 발생 최대전단응력비를 그림 7(a), (b)에 나타내었다.

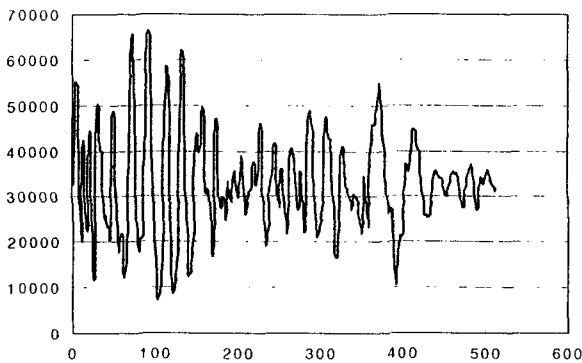


그림 5. 실험입력 지진파 (Coalinga, M=6.5)

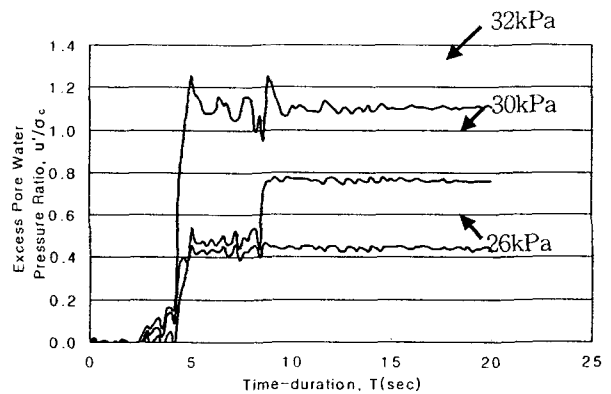
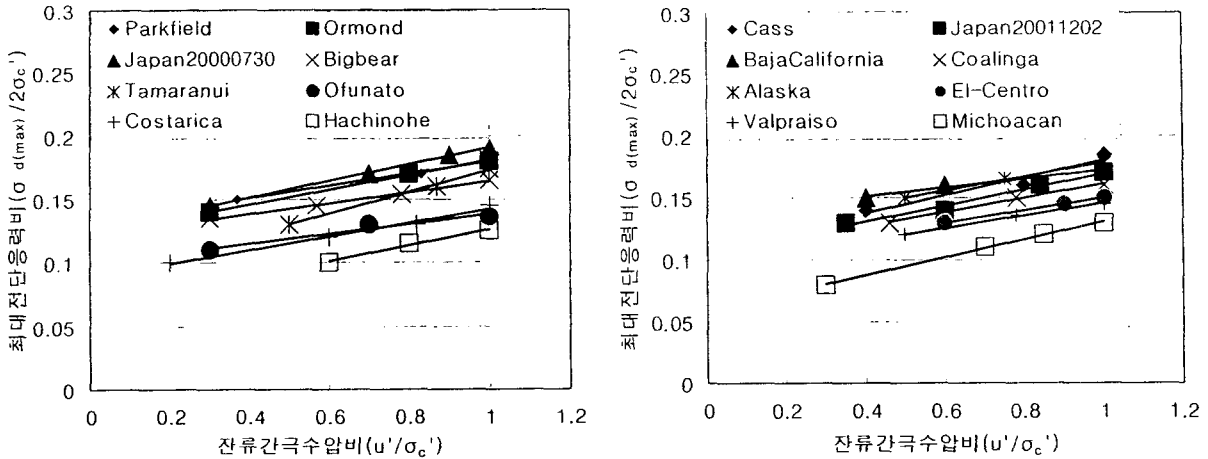


그림 6. 시간에 따른 잔류간극수압비

그림 7에서 액상화가 발생할 때의 최대축차응력을 정리한 결과 지진규모가 증가할수록 액상화 발생 최대축차응력은 감소하는 것으로 나타났다. 16개의 실지진파형 진동삼축시험 결과에서 지진파형에 따라

지진규모에 따른 액상화 발생 최대축차응력을 정리하여 그림 8과 표 5에 나타내었다.



(a) 충격형 지진파형 (b) 진동형 지진파형

그림 7. 잔류간극수압비에 따른 최대전단응력비

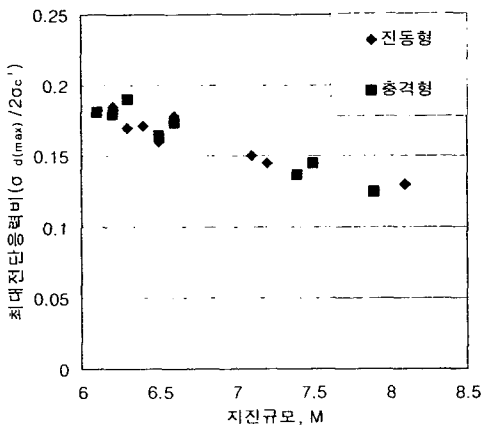


그림 8. 지진규모에 따른 액상화 발생 최대전단응력비

표 5. 지진규모에 따른 액상화 발생 최대축차응력

지진파 (충격형)	지진 규모	액상화 발생 최대축차응력, $\sigma_{d(max)}$ (kPa)	지진파 (진동형)	지진 규모	액상화 발생 최대축차응력, $\sigma_{d(max)}$ (kPa)
Parkfield	6.1	36.2	Cass	6.2	37.0
Ormond	6.2	36.0	Japan2001.12.02	6.3	34.0
Japan2000.07.30	6.3	38.0	BajaCalifornia	6.4	34.3
Big Bear	6.5	33.0	Coalinga	6.5	32.0
Tamaranui	6.6	34.7	Alaska	6.6	35.6
Ofunato	7.4	27.3	El-Centro	7.1	30.0
Costarica	7.5	29.0	Valpraiso	7.2	29.0
Hachinohe	7.9	25.0	Michoacan	8.1	26.0

#### 4. 결과분석

##### 4.1 실지진파형 실험결과와 등가전단응력의 비교

그림 9는 실지속시간을 고려한 실지진파형 진동삼축시험 결과와 등가전단응력 개념에 의해 산정된 액상화 저항강도비에 0.65를 곱한 것을 함께 나타낸 것이다. 그림 9에서 보면 정현파형을 사용했을 때의 액상화 저항강도비와 실지진파형을 작용시켰을 때의 액상화 발생 최대전단응력비는 지진규모 6.5에서 거의 일치하고 6.5보다 작은 지진규모에서 액상화 저항강도는 실지진파형 진동삼축시험 결과가 정현파형 진동삼축시험 결과보다 크게 산정되었다. 또한 6.5 이상의 지진규모에서 실지진파형을 사용했을 때의 액상화 저항강도는 정현파형을 사용했을 때보다 작은 값이 나왔다. 따라서 지진규모 6.5 이상에서 기존의 등가전단응력 개념을 사용한 진동삼축시험 결과는 액상화 저항강도를 실제 지진력이 작용했을 때보다 높게 산정하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 10은 중진규모에서의 잔류간극수압비에 따른 최대전단응력비의 범위를 나타낸 것으로 충격형과 진동형의 액상화 저항강도비는 큰 차이를 보이지 않았으며 강진 규모의 경우도 이와 유사한 결과를 나타냈다. 이는 액상화는 지진 발생시 진동의 횟수보다는 최대가속도의 영향을 보다 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.2 등가반복재하횟수에 따른 실험결과 비교

실지진가속도 기록만으로는 지진의 규모 및 특성 등을 모두 나타낼 수 없기 때문에 Seed와 Idriss(1975)의 등가반복 재하횟수 산정과정에 의하여 본 실험에 사용된 실지진파의 등가반복 재하횟수를 산정하여 그림 11에 함께 나타낸 것이고, 그림 11은 이렇게 구한 등가반복재하횟수에 따른 실지진하중을 이용한 진동삼축시험 결과인 액상화저항강도를 지진규모별, 파형별로 분류하여 나타낸 것이다. 진동횟수가 많은 진동형 지진파형이 충격형 지진파형 보다 등가반복재하횟수가 크게 산정됨을 알 수 있다. 그림 12는 이렇게 구한 등가반복재하횟수에 따른 실지진파를 사용하여 구한 액상화 저항강도비를 정현파를 이용한 실험결과와 함께 나타낸 것이다. 그림 12에서 실선은 정현파형 실험결과에 0.65를 곱한 것으로 실지진파형 실험결과, 등가반복재하횟수에 따른 액상화 저항강도는 중진규모의 경우 정현파형 실험 결과보다 크게 산정되었고, 강진규모의 경우는 정현파형 실험결과보다 작게 산정되어 그림 9의 지진규모에 따른 액상화저항강도와 유사한 결과를 나타내었다. 진동형과 충격형의 지진파 형태에 따른 액상화 저항강도비의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않은 이유는 액상화는 일반적으로 지진 발생시 단층의 갑작스런 파괴에 의해 발생한 지진파의 최대가속도의 영향을 받기 때문에 지진파 형태에 따른 영향은 미비하게 나타난 것으로 판단된다.

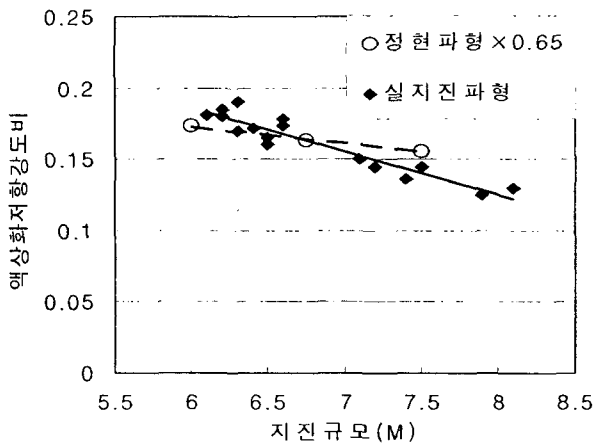


그림 9. 정현파형과 실지진파형 진동삼축시험 결과의 비교

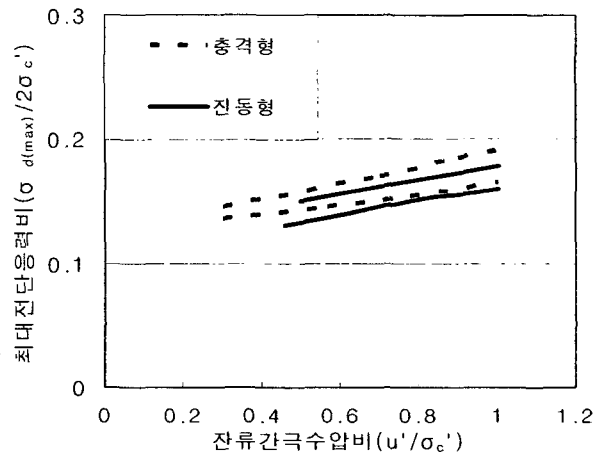


그림 10. 잔류간극수압비에 따른 최대전단 응력비의 범위

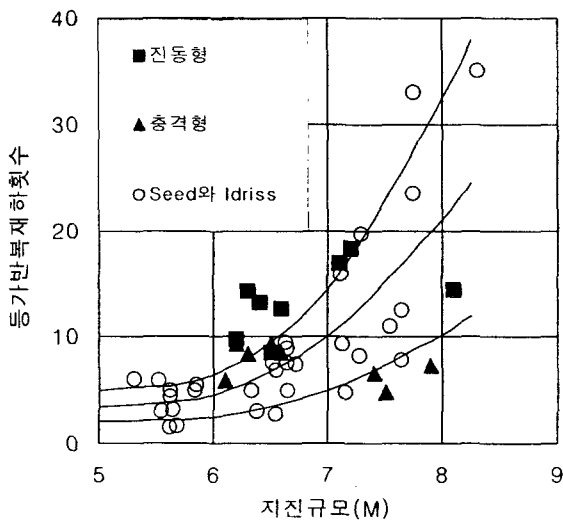


그림 11. 지진파형별 잔류간극수압비에 따른 최대전단응력비

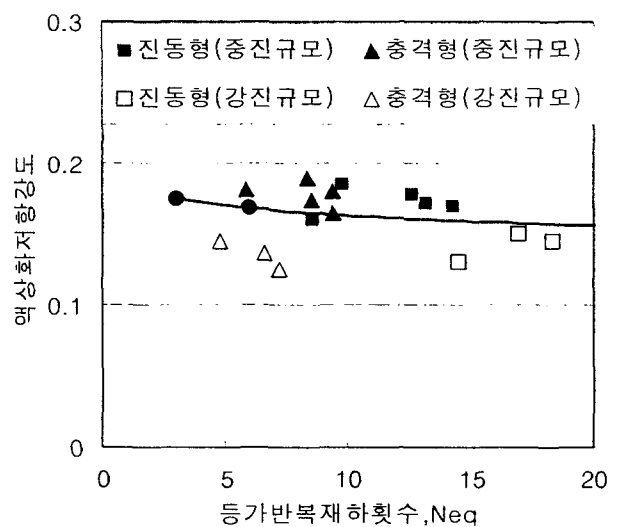


그림 12. 등가반복재하횟수와 액상화발생 최대전단응력비

## 5. 결론

본 연구에서는 액상화 저항강도 산정방법 중 가장 기본적으로 사용하는 등가전단응력 개념에 의한 액상화 저항강도를 실험적으로 검토하고 실제 지진과 같은 불규칙한 전단응력을 고려하여 액상화 저항강도를 산정하였다. 특히 국내의 지진규모에 적합한 지진기록을 대상으로 지진파의 형태를 충격형, 진동형으로 구분하여 액상화 저항강도 특성을 분석하였으며, 강진규모의 지진파에 대해서도 비교 분석하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 지진규모에 따른 실지진파형 진동삼축시험 결과, 지진규모가 증가할수록 액상화 발생 최대전단응력비는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 실지진파형 진동삼축시험 결과에서 산정한 액상화 저항강도와 기존의 등가전단응력 개념에 기초한 액상화 저항강도를 비교해 본 결과, 지진규모 6.5 이상에서는 등가전단응력 개념에 기초한 액상화 저항강도가 크게 산정되었고, 지진규모 6.5 이하에서는 등가전단응력 개념에 의한 액상화 저항강도가 실지진력을 작용시켰을 때보다 낮게 산정되었다. 따라서 우리나라와 같은 중진지역의 경우 액상화 안전율을 실제보다 낮게 산정하는 비경제적인 평가임을 확인할 수 있다.
- (2) 불규칙파의 지진파 형태에 따른 영향을 실험을 통하여 살펴본 결과, 충격형, 진동형 지진파 형태에 따른 액상화 발생 최대전단응력비는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 이는 지반의 액상화 저항강도는 지진 발생시 지진파의 형태보다는 지진파의 최대가속도에 더 많은 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 액상화 저항강도 산정시 불규칙파의 지진파 형태에 따른 수정계수를 구분하여 사용하지 않아도 될 것으로 판단된다.
- (3) 실지진가속도 기록의 등가반복재하횟수에 기초한 액상화 저항강도비 산정방법은 지진규모에 따른 액상화 저항강도비 산정방법과 유사한 결과를 나타냈다. 즉 강진규모의 액상화 저항강도는 등가전단응력 개념에 의한 액상화 저항강도보다 낮게 산정되었고, 중진규모의 액상화 저항강도는 등가전단응력 개념에 의한 액상화 저항강도보다 높게 산정되었다.

## 참고문헌

1. 심재욱 (2001), "실지진하중을 이용한 포화사질토의 액상화 저항강도 산정에 관한 실험적 연구", 연세대학교 석사학위 논문
2. Annaki, M. and Lee, K. L. (1977), "Equivalent Uniform Cyclic Concept for Soil Dynamics," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT6, pp.549-563.
3. 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.
4. Kramer, S. L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, pp.384-422.
5. Liu, A. H., Stewart, J. P., Abrahamson, N. A., and Moriwaki, Y. (2001), "Equivalent Number of Uniform Stress Cycles for Soil Liquefaction Analysis," *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 12, pp.1017-1026.
6. Port and Harbour Research Institute (1997), *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A. A. Balkema.
7. 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.
8. 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.