

## 기존의 액상화 평가기법 및 그 적용성에 관한 연구

### A Study on the Conventional Liquefaction Analysis and Application to Korean Liquefaction Hazard Zones

박인준<sup>1)</sup>, Park, Inn-Joon, 신윤섭<sup>2)</sup>, Shin, Yun-Sup, 최재순<sup>3)</sup>, Choi, Jea-Soon, 김수일<sup>4)</sup>, Kim, Soo-II

<sup>1)</sup> 연세대학교 토목공학과 박사 후 연수과정, Post Doctor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yonsei

<sup>2)</sup> 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yonsei

<sup>3)</sup> 연세대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yonsei

<sup>4)</sup> 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yonsei

**개요(SYNOPSIS) :** An assessment of liquefaction potential is made in principle by comparing the shear stress induced by earthquake to the liquefaction strength of the soil. In this study, a modified method based on Seed and Idriss theory is developed for evaluating liquefaction potential. The shear stress in the ground can be evaluated with seismic response analysis and the liquefaction strength of the soil can be investigated by using cyclic triaxial tests. The cyclic triaxial tests are conducted in two different conditions in order to investigate the factors affecting liquefaction strength such as cyclic shear stress amplitude and relative density. And performance of the modified method in practical examples is demonstrated by applying it to liquefaction analysis of artificial zones with dimensions and material properties similar to those in a typical field.

From the result, the modified method for assessing liquefaction potential can successfully evaluate the safety factor under moderate magnitude(M=6.5) of earthquake.

**Key words :** liquefaction potential, Seed and Idriss, cyclic shear stress ratio, liquefaction strength, seismic response analysis, cyclic triaxial test,

## 1. 서론

기존의 액상화 평가기법은 대부분 미국, 일본, 그리고 유럽과 같이 지진 발생빈도가 높고 그로 인해 액상화 피해가 빈번한 국가에서 주도적으로 연구되어왔다. 이런 지역적 특성을 토대로 개발된 액상화 평가방법들은 높은 지진규모(M=7.5)에 바탕을 두고 있다. 그러므로 본 연구에서는 국내소개된 기존의 액상화방법(Seed와 Idriss방법)을 분석한 후 국내지진특성에 맞도록 수정 보완하고자 한다. 또한 진동 삼축시험을 통해 국내사질토 특성에 맞는 액상화저항강도곡선을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안한 액상화저항강도곡선을 이용하여 사질토지반에 대해 액상화 평가를 수행하여 보다 합리적인 액상화 평가 방법을 제시하였다.

## 2. 액상화 평가이론

역학적 측면에서 액상화는 급속한 진동하중 재하로 발생된 과잉간극수압이 흙이 보유하고 있는 유효 응력을 점차 감소시켜 결국 흙이 전단저항력을 상실하게 되는 현상이다. 따라서, 일반적으로 액상화 발생가능성을 판단하는 액상화 평가는 지진에 의한 전단응력과 지반의 액상화저항강도의 비교를 통해 수행된다. Seed와 Idriss는 액상화 평가이론의 대표적인 연구자로서 액상화 평가방법을 크게 지진응답해

석 및 간편법에 의한 해석방법과 실내시험을 이용한 해석방법으로 구분하였다(Seed and Lee, 1966). 특히 지진규모에 대한 고려가 가능하도록 평가이론을 제안하였다.

본 연구에서는 Seed와 Idriss가 제안한 액상화 평가방법을 수정, 보완하여 간편법을 제시하였으며 진동삼축시험을 통한 액상화 상세예측법을 제안하였다.

### 2.1 수정된 Seed 와 Idriss의 액상화 평가 간편법

일본의 건축물 내진설계기준의 액상화 평가방법으로 사용되고 있는 Seed와 Idriss의 방법을 보면, 지진시 발생하는 전단응력비는 지진응답해석을 통해서 구한 지표면 최대가속도나 국가별로 제안된 기본가속도와 지반계수를 통해 구해진 지표면 최대가속도를 바탕으로 산정한다. 지진응답해석을 통해서 지표면 최대가속도를 구할 때는 지진시 발생하는 과잉간극수압을 고려하지 않는 전응력해석을 수행하는데 이는 다소 지진력을 과소 평가하는 경향이 있다. 과잉간극수압을 고려하여 지진응답해석을 수행 할 경우 보다 많은 지반물성을 필요로 하고 이로 인한 오차 발생가능성이 높기 때문에 과잉간극수압을 무시하는 전응력해석방법을 간편법으로 제시하였다(Seed, 1979 ; Seed, et al., 1981). 이를 바탕으로 수정, 보완된 액상화평가 방법을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

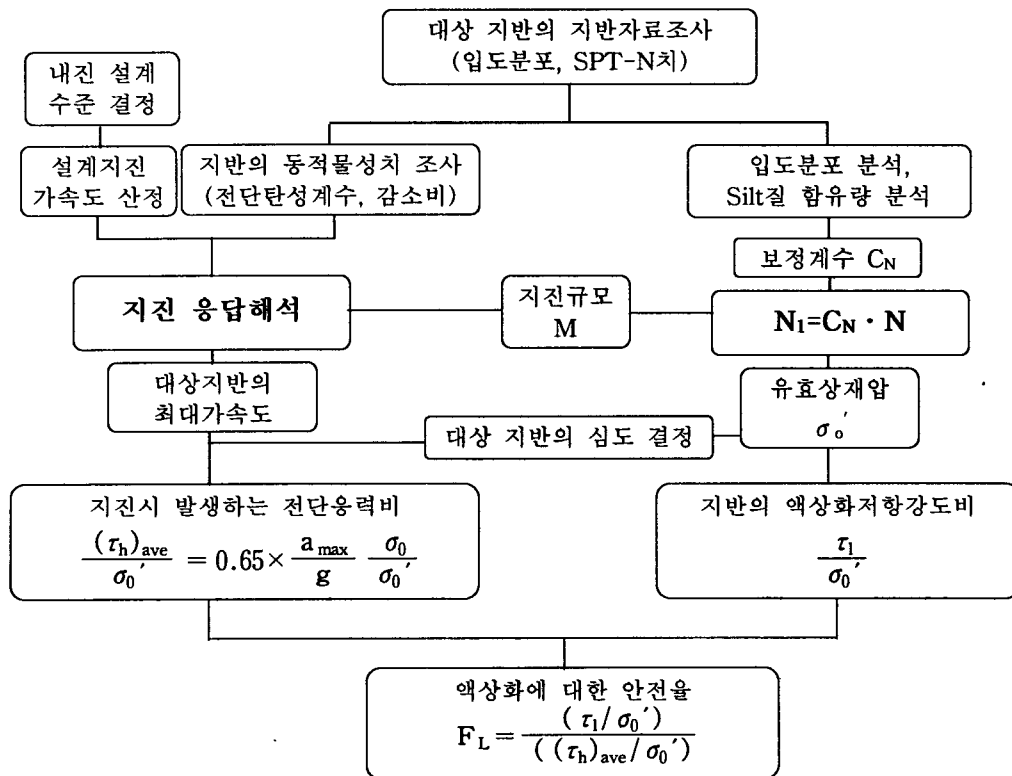


그림 1. 액상화평가를 위한 간편법

그림 1.은 지진에 의한 전단응력비와 지반의 액상화저항강도비의 비교를 통해서 액상화발생가능성을 예측하는 간편법을 나타낸 순서도이다. 전단응력을 산정하는 과정에서 대상지반의 최대가속도는 건설교통부 주관으로 제정된 상위개념의 내진설계기준에서 제시된 설계지진가속도(건설교통부, 1988)를 바탕으로 지진응답해석을 수행하여 산정한다. 또한 Seed 와 Idriss는 많은 지진기록에 대한 분석을 통해 지진력을 최대전단응력의 65% 수준의 등가전단응력으로 표현함으로써 보다 간편하게 지진력을 산정 할 수 있다는 것을 제안하였다(Seed et al., 1975). 제안된 결과를 이용하여 최대전단응력의 65%에 해당하는 평균전단응력을 액상화평가지 이용하였다. 이에 관련하여 등가전단응력개념을 개략적으로 도시하면 그림 2.와 같다.

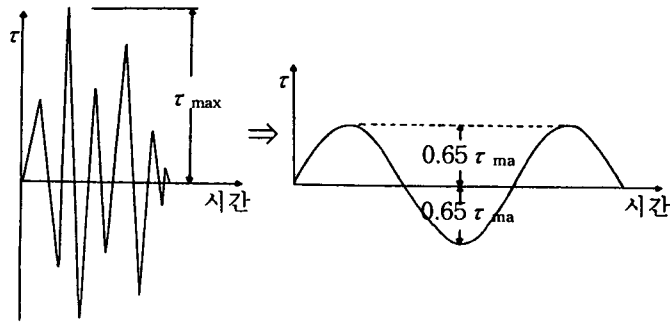


그림 2. 등가전단응력개념 (Seed et al, 1975)

그림 2.는 불규칙한 지진파를 규칙적인 정현파로 산정하는 과정을 나타낸 것으로 많은 실험을 통해서 분석한 등가전단응력개념을 보여주고 있다. 그러므로 지진시 전단응력비를 산정 할 때는 최대지진가속도의 65%에 해당하는 값을 평균값으로 나타낸다.

지반의 액상화저항강도를 산정 할 때는 실내시험과 현장시험자료를 분석한 후 지진규모에 따른 액상화저항강도비를 구하는 간편법을 이용한다. 이 방법은 표준관입저항치인  $N$ 치와 유효상재압에 따른 보정계수  $C_N$ 를 통해서 지반의 액상화저항강도비를 구하는 방법이다. 이렇게 구한 지진에 의한 전단응력과 지반의 액상화저항강도 사이의 비를 통해서 대상지반의 액상화가능성을 평가한다.

## 2.2 진동삼축시험을 통한 액상화 상세 예측법

액상화를 평가하는 다른 방법으로 진동삼축시험을 통해 액상화가능성을 예측하는 상세예측법이 있다. 이 방법은 대상지반에 대해 지반자료를 조사하고 이를 바탕으로 지진응답해석을 수행하여 지진에 의해 발생하는 전단응력을 계산한다. 이렇게 산정된 전단응력과 액상화저항강도를 비교하여 액상화가능성을 평가한다. 상세 예측법으로 지반의 액상화 저항강도비를 구할 때는 지진하중을 고려한 현장시험을 수행하여 구하는 것이 바람직하나 실제 이 시험의 수행은 거의 불가능하므로 대부분의 경우, 일정한 정현하중을 재하하여 액상화저항강도를 산정하는 실내시험을 이용한다. 특히, 지진에 대한 연구가 활발한 일본에서는 진동삼축시험 및 진동대시험을 주로 이용하고 있다. 진동삼축시험 결과를 이용하여 액상화를 평가 할 때는 지진규모와 등가진동재하횟수와와의 관계를 산정해야한다. Seed와 Idriss는 지진규모와 액상화 저항강도비와 관련 있는 등가진동재하 횟수와와의 관계를 다음 표에서와 같이 규명하였다(Seed et al, 1981).

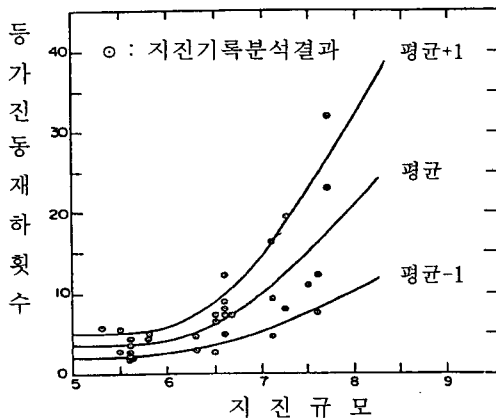


그림 3. 지진기록과 등가진동재하횟수 (Seed et al, 1975)

표 1. 지진규모별 등가진동재하횟수

지진규모	0.65 $\tau_{max}$ 에 대한 등가진동재하횟수
8.5	26
7.5	15
6.75	10
6.0	5-6
5.25	2-3

(Seed et al, 1981)

그림 3.과 표 1.은 지진규모와 그에 따른 등가진동재하횟수와의 관계를 나타낸 것으로 1975년에 발표된 결과와 1981년도에 수정, 보완된 결과를 나타낸 것이다. 이렇게 구한 등가진동재하횟수와 실내시험 결과와의 관계를 통해서 액상화저항강도비를 산정 할 수 있다. 그림 4.는 일본향만연구소에서 수행한 시험결과를 나타낸 것이다.

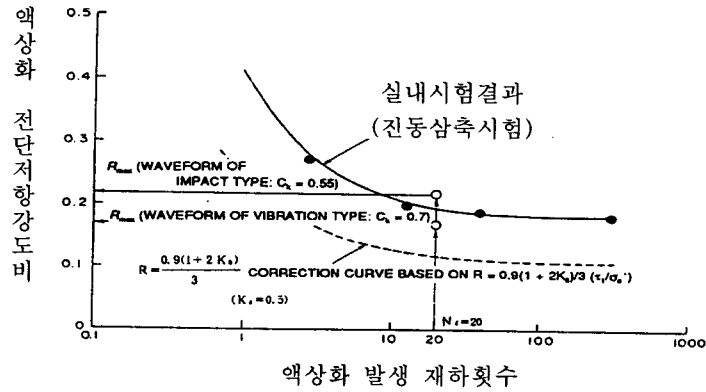


그림 4. 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가 (일본 향만연구소, 1997)

그림 4.에서 볼 수 있듯이 일본에서는 지진규모 7.5를 기준으로 등가진동재하횟수 20회를 사용하고 있으며 충격형과 진동형 지진파에 대해 보정을 하여 액상화전단강도비를 산출하고 있다. 국내에서는 지난 1세기동안 지진규모 6이상의 지진이 발생한 예가 없는 점을 고려하여 발생 예상 지진규모와 함께 액상화 발생 재하횟수를 감소시킴으로써 액상화 저항강도비 수준을 높이는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 국내 지진규모를 고려하여 최대지진규모를 6.5로 정하고 Seed의 이론(Seed, et al., 1981)을 참조하여 액상화발생 재하횟수를 10회로 선정하였다. 이를 바탕으로 액상화저항강도비를 구하며 지진시 발생하는 전단응력비와의 관계를 통해서 액상화발생 가능성을 예측한다.

### 3. 사질토 지반에서의 액상화가능성 예측

본 연구에서는 주문진 표준사를 대상으로 진동삼축시험을 수행하여 국내사질토지반 특성에 맞는 액상화저항강도곡선을 제안하고 이를 이용하여 가상의 사질토지반에 대해 액상화가능성을 평가해 보고자 한다. 먼저 사질토지반을 대표할 수 있는 주문진 표준사에 대한 진동삼축시험을 수행하였다.

#### 3.1 진동삼축시험을 통한 액상화저항강도 곡선

시험에 이용된 장비는 C. K. Chan에 의해 고안된 것이며 시험시료의 형상은 원주형으로 직경 35mm, 50mm, 70mm 세 종류가 있으며 재료의 동적거동 특성을 보기 위해서 직경 50mm, 높이 100mm인 시료를 선택하여 시험을 수행하였다. 표 2.는 시험시료의 기본물성 및 진동삼축시험 제반조건을 나타내고 있다.

표 2. 시료 기본물성과 진동삼축시험 제반조건

주문진 표준사 시료에 관한 내용		진동삼축시험조건	
곡률계수, $C_c$	1.23	초기유효구속압 (kPa)	100
균등계수, $C_u$	1.17	상대밀도(%)	50, 60, 70
최대건조단위중량, $\gamma_{dmax}$	1.60	진동수 (Hz)	1
최소건조단위중량, $\gamma_{dmin}$	1.39	재하하중방식	정현파
시료 포화 방법	수중침강법	하중제어방식	응력제어

진동삼축시험시 초기유효구속압은 100kPa로 액상화가 발생하기 쉬운 지반심도를 선택했으며 상대밀도는 50~70%에 이르는 다양한 지반을 모델링하였다. 진동수는 지진을 재현할 수 있는 진동수인 1Hz로 시험을 수행하였다. 각각의 경우 유효구속압에 대한 저항강도비를 0.1~0.5수준으로 변화시키면서 액상화 발생시기를 조사하였다. 진동삼축시험결과, 상대밀도가 50%인 경우 대표적인 저항강도비에 대한 진동 재하횟수별 간극수압의 변화는 다음의 그림 5.와 같으며 전체적인 시험결과를 그림 6.에 도시하였다.

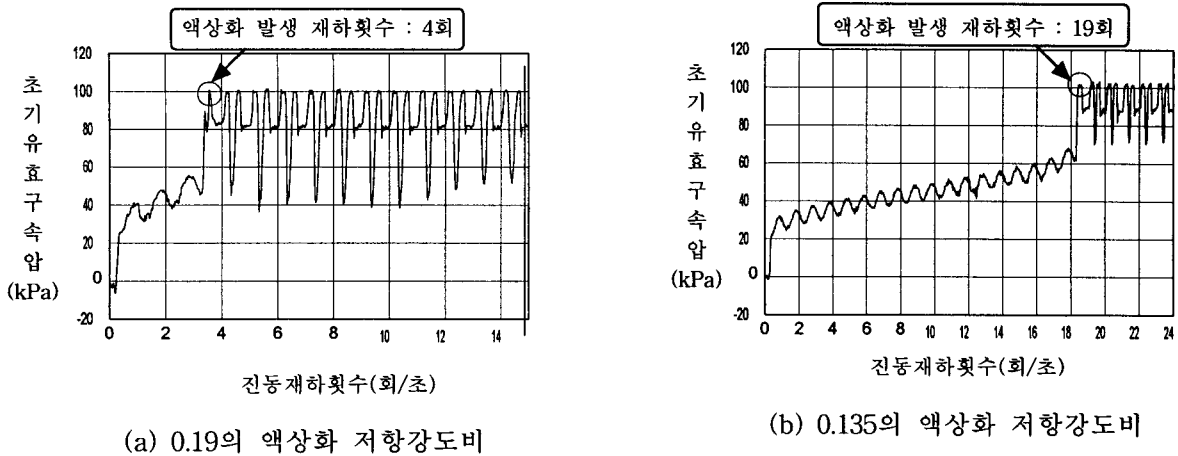


그림 5. 진동삼축시험결과 (시간에 따른 간극수압의 변화)

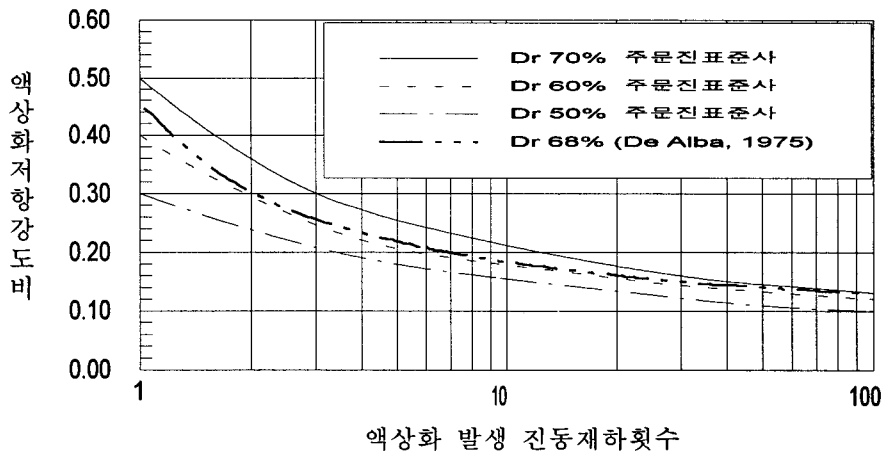


그림 6. 진동삼축시험결과 액상화저항강도비와 진동재하횟수

상대밀도가 50%인 시료에 대한 대표적인 시험결과에서 알 수 있듯이 전단강도비와 액상화발생 진동 재하 횟수는 반 비례 관계를 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같이 50%, 60%, 70%시료에 대한 시험결과를 종합하여 액상화발생 진동 재하재하횟수와 저항강도비 관계를 도시하였다. 그림 6.에서 알 수 있듯이 주문진 표준사를 대상으로 상대밀도를 변화시켜가면서 수행한 진동삼축시험결과 상대밀도가 증가할수록 액상화저항강도비가 증가하는 것을 알 수 있다. 시험결과를 분석하기 위해서 매우 큰 크기의 불교란 Monterey 모래 68%인 지반을 대상으로 1975년 De Alba 등이 실험한 단순전단시험 결과를 비교하였다. 이때, 유효구속압은 100kPa과 1kg/cm<sup>2</sup>으로 거의 동일한 수준이다. 시험결과, 전반적으로 비슷한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다(Seed, et al., 1975).

또한, 현장상태를 재현하기 위해서 실험실에서의 결과 값을 보정해주어야 하는데 Seed의 방법에 기초

하여 보정한 결과 실험실에서 구한 저항강도비의 90%에 해당하는 값을 액상화저항강도비로 산정해 낼 수 있었다(Seed, 1979). 보정한 후의 액상화발생 진동 재하재하횟수와 저항강도비 관계를 도시하면 그림 7.과 같다.

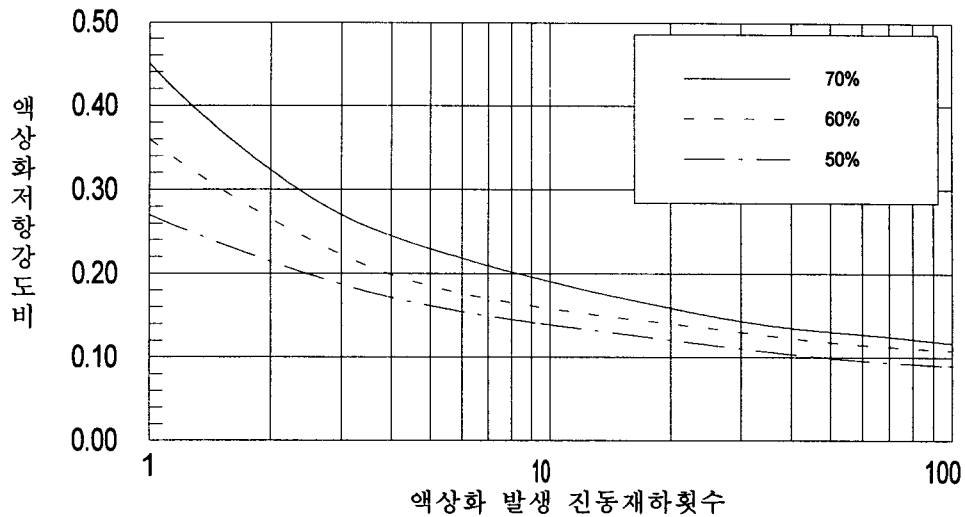


그림 7. 진동삼축시험에 기초한 액상화저항강도비 산정

진동삼축시험결과보정시 이용된 보정계수( $C_r$ )의 값은 0.9로 이는 정지토압계수( $K_0$ )의 값 1.0에 해당하는 값이다. 이 때, 정지토압계수는 포화 주문진 표준사의 내부마찰각( $\phi$ )을  $0^\circ$ 로 가정하고 Jacky의 식 ( $=1-\sin \phi$ )에 적용하여 산정하였다. 최종결정된 액상화저항강도비는 다음과 같다.

표 3. 최종 결정된 액상화 전단저항응력비

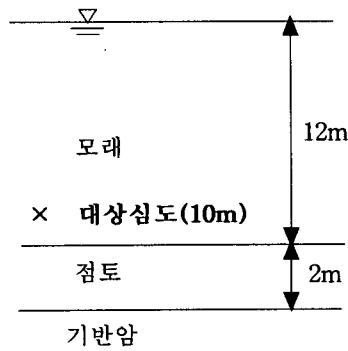
구 분	상대밀도 50%	상대밀도 60%	상대밀도 70%
액상화저항강도비	0.14	0.16	0.19
비 고	액상화 발생횟수 10회 (지진규모 6.5 기준), $C_r = 0.9$ ( $K_0 = 1.0$ )		

### 3.2 가상 지반에 대한 액상화가능성 예측

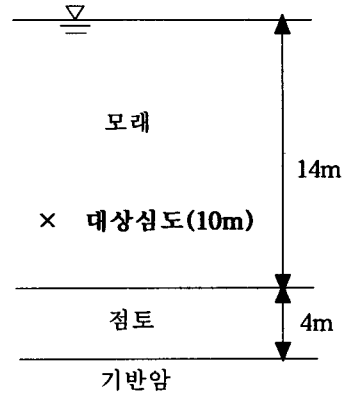
진동삼축시험을 바탕으로 지반의 액상화가능성을 평가해 보기 위해서 임의의 가상 지반을 선정하여 액상화평가를 실시하였다. 대상지반은 모래질, 점토지반으로 지하수위가 지표에 위치하고 있다. 대상 지반의 개략적인 재원과 주상도를 다음 표 4.와 그림 8.에 나타내었다.

표 4. 액상화평가 대상지반의 재원

지반	재원	지반종류	지반심도	지하수위	단위중량 ( $t/m^2$ )	N치	Silt함유량 (%)
Site1		주문진표준사	14m	지표	1.76~1.94	3~45	0.0
Site2		주문진표준사	18m	지표	1.76~1.94	2~30	0.0



(a) 가상대상지반 (Site1)



(b) 가상대상지반 (Site2)

그림 8. 가상대상지반의 주상도

액상화현상을 평가하기 위해서 지진시 발생하는 전단응력을 산정해야 한다. 전단응력을 산정하기 위해서 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석을 수행할 때는 상용프로그램인 Shake91을 사용하였다. Shake91은 다층반사모델을 이용한 1차원 등가선형해석을 수행하고 있다. 설계지진가속도는 붕괴방지수 준 내진 I 등급, 내진 II 등급에 해당하는 0.154g, 0.11g로 정하였고 입력지진자료는 1968년 Hachinohe항에서 계측된 지진자료를 이용하였다(Port and Harbour, 1997). 각각의 지반은 시험을 통해서 구한 액상화 저항강도 값과의 비교를 위해서 대상지반을 10m로 산정하였다. 이렇게 구한 전단응력과 지반의 액상화 저항강도와의 비교를 통해 구한 안전율을 표 5에 나타내었다.

표 5. 상대밀도에 따른 액상화에 대한 안전율

	설계지진가속도	50%	60%	70%
Site1	0.11g	0.98	1.12	1.33
	0.154g	0.70	0.80	0.95
Site2	0.11g	0.99	1.13	1.34
	0.154g	0.71	0.83	0.98

산정한 전단응력비와 진동삼축시험결과 액상화전단강도비와의 비교를 통해서 지반의 액상화발생 가능성을 예측하게 된다. 대상지반중 site1은 설계지진가속도 0.11g를 기준으로 할 때 지반심도 10m지역은 상대밀도가 60%이상 되면 액상화에 대해 안전한 것으로 나타났다. 0.154g를 기준으로 해석 할 때는 액상화발생가능성이 높기 때문에 상대밀도를 높이거나 실트질 함유량을 높이는 등 다른 액상화 대책공법을 이용하여 액상화발생가능성을 낮출 필요가 있다고 사료된다. Site2 경우도 상대밀도가 60%이상 되면 액상화에 대해 안전한 것으로 나타났다.

결국 국내지진규모 고려시 개량 후 지반의 상대밀도가 60%이상 보장된다면 액상화 발생 가능성이 있는 지반심도는 15m 이내로 추정할 수 있다고 평가 된다.

#### 4. 결론 및 추후 과제

본 연구에서는 주문진 표준사를 대상으로 진동삼축시험하여 이를 바탕으로 액상화평가를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 내용은 다음과 같다.

- 1) 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가방법을 체계적으로 정립하고 이를 지진규모가 작은 현실을 고려하여 국내 실정에 맞도록 수정 보완하였다. 국내 발생예상 최대지진규모 6.5 기준시 액상화 발생재하횟수를 10회로 선정하였다.
- 2) 국내 주문진 표준사를 대상으로 한 진동삼축시험의 수행 및 이를 기초로 한 액상화 전단저항용력비 산정하였다.
- 3) 가상지반을 대상으로 진동삼축시험결과를 바탕으로 액상화평가를 수행하였다.
- 4) 국내지진규모 고려시 지반의 상대밀도가 60%이상 보장된다면 액상화 발생 가능성이 있는 지반심도는 15m 이내로 추정할 수 있다.

본 연구를 통해 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가가 신뢰성이 높음을 확인하였으며 특히, 지진자료가 부족한 국내 현실 및 지진활동이 활발하지 않은 국내 지진특성을 감안할 때, 이러한 실험적 연구보다 국내 현실에 적합한 액상화 연구가 수행가능할 것으로 판단된다. 또한 액상화평가지 지반 심도에 따른 액상화가능성을 평가하기 위해서 다양한 구속압에 따른 실내시험이 요구된다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 STEPI(N2-01-01-A-04) "지진재해 대응기술 개발사업"과 KEERC(97K3-1301-02-03) "기초와 지반의 지진응답특성 규명연구"의 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. De Alba, P., Seed, H. B., and Chan. C. K.(1976), "Sand Liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.102, No.9, pp.909-927.
2. Kramer, S. L.(1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, pp.348-422.
3. Port and Harbour Research Institute.(1997), *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A. A. Balkema.
4. 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.
5. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1967), "Analysis of Soil Liquefaction : Niigata Earthquake," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 93, No. SM6, pp.83-108.
6. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.97, No.9, pp.1249-1273.
7. Seed, H. B. and Lee, K. L. (1966). "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading". *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE. No.6, pp.105-134.
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", *EERC*, UCB, EERC-75/29.
9. Seed, H. B., Idriss, I. M., Ignacio Arango.(1981), "Evaluation Of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.109, No.3, pp.458-483.
10. 한국지진공학회.(1997), 내진설계기준 개발 연구(Ⅱ), 한국지진공학회, pp.29-41.