

진동삼축시험에 기초한 액상화 평가 Assessment of Liquefaction Potential based on the Cyclic Triaxial Test

최재순*
Choi, Jae-Soon

박인준**
Park, Inn-Joon

김수일***
Kim, Soo-Il

ABSTRACT

An assessment of liquefaction potential is made in principle by comparing earthquake induced shear stress to the liquefaction strength of the soil. In this research, a modified method based on Seed and Idriss theory is developed for evaluating liquefaction strength of Jumunjin sand (Korean standard sand). Also, the factors affecting liquefaction strength such as cyclic shear stress amplitude and relative density are investigated and verified by using cyclic triaxial test.

From the result, the new relationships between cyclic shear stress ratio and number of load cycles are proposed for evaluating liquefaction strength under moderate magnitude(M=6.5) of earthquake.

1. 서론

최근, 엘리뇨현상과 같은 기상이변과 함께 지각변동으로 인한 지진발생이 증가하면서 전세계적으로 이에 대한 대책마련의 연구가 집중적으로 수행되고 있는 실정이다. 우리 나라에서도 장차 발생할지도 모를 지진에 대한 연구를 위해 1997년 지진공학회 및 지진공학연구센터를 설립하여 이와 관련된 지질학, 토목공학, 건축공학, 통계학 등 여러 분야의 연구를 종합한 장기계획을 마련하고 본격적인 연구를 시작하였다. 그러나 지진기록 및 피해사례 등 지진연구에 필요한 국내 자료 등이 부족하여 연구에 많은 어려움이 따르고 있다. 따라서, 대개의 경우, 지진연구가 발달한 미국 및 일본의 연구문헌에 대한 분석과 병행하여 이러한 외국의 연구결과들을 국내 실정에 적합하도록 수정 보완하는 연구를 우선적으로 수행하고 있는 실정이다. 특히, 시설물의 내진설계에 관한 연구는 시설물의 안전과 함께 그에 따른 경제적 비용도 크게 고려되어야 하므로 최근, 국내에서는 향후 발생가능한 최대지진수준에 대한 논의가 여러 방면에서 검토되고 있다.

최근, 발생한 외국의 지진피해사례들을 살펴보면, 주 피해원인이 지반의 액상화 발생으로 인한 지반의 파괴 및 구조물의 침하 등인 것으로 나타났다. 따라서, 미국, 일본의 내진설계규정에서는 지반의 액상화 평가를 최우선 검토사안으로 규정하고 있으며 최근까지도 공진주시험(Resonance Column Test), 진동 실삼축시험(Cyclic Truly Triaxial Test), 진동삼축시험(Cyclic Triaxial Test), 진동진단시험(Cyclic Simple Shaer Test), 그리고, 진동대시험(Shaking Table Test) 등의 실험적

* 연세대학교 토목공학과 박사과정, 정회원

** 연세대학교 토목공학과 박사후 연수과정, 정회원

*** 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

연구를 병행하여 관련기준들을 계속 수정 보완하는 연구가 심도있게 진행되고 있다.

본 연구에서는 미국 및 일본의 여러 문헌에 대한 분석을 통해 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가방법을 정립하고 주문진 표준사를 대상으로 진동삼축시험을 수행하였다.

2. 실내시험에 기초한 액상화 평가이론

역학적 측면에서의 액상화는 급속한 진동하중 재하로 발생된 과잉간극수압이 흙이 보유하고 있는 유효응력을 점차 감소시켜 결국 토체의 지지력을 상실하게 되는 현상으로 정의되며 액상화 발생가능성을 판단하는 액상화 평가는 일반적으로 지진에 의한 전단응력과 지반의 액상화 저항응력의 비교를 통해 수행되고 있다.

Seed와 Idriss는 액상화 평가이론연구의 대표적인 연구자로서 액상화 평가방법을 크게 지진응답 해석 및 간편법을 통한 해석과 실내시험을 이용한 방법으로 구분하였으며 특히 지진규모에 대한 고려가 가능하도록 평가이론을 제안하였다. Seed와 Idriss가 제안한 액상화 평가방법 중 실내시험을 이용한 방법을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 Seed와 Idriss의 액상화 평가이론

공학적인 측면에서의 지진은 주로 전단응력 또는 가속도의 향으로 표현하며 실제 지진계를 통해 계측된 지진자료는 가속도 시간이력이다. 따라서, 대부분의 지진공학자들은 가속도 및 전단응력을 통해 지진력을 표현하고 있다. Seed와 Idriss는 많은 지진기록에 대한 분석을 통해 지진력을 최대전단응력의 65% 수준의 등가전단응력으로 표현함으로써 보다 간편하게 지진력을 산정하도록 제안하였다. 전반적인 등가전단응력개념을 개략적으로 도시하면 그림 1과 같으며 분석된 연구결과는 다음의 그림 2와 같다.

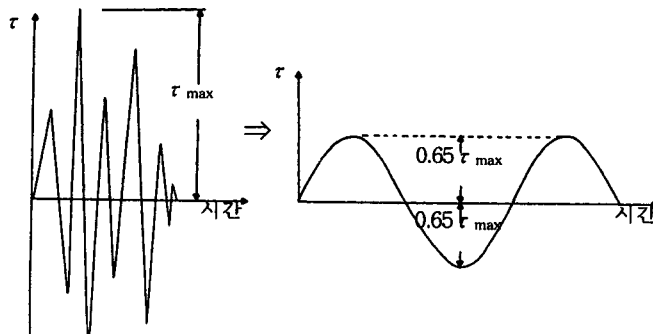


그림 1 등가전단응력개념 (Seed et al, 1975)

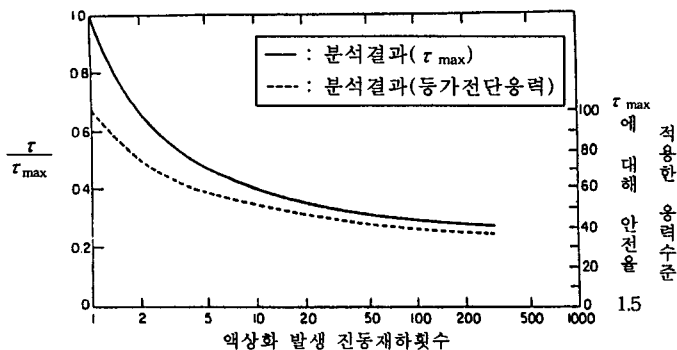


그림 2 가속도 시간이력에 대한 분석결과 (Seed et al, 1975)

또한, Seed와 Idriss는 지진규모에 대한 고려를 위해 등가전단응력 $0.65 \tau_{max}$ 은 고정시키고 이에 해당하는 지진규모별 진동재하횟수를 제안하였다. 1971년에는 지진규모 8, 7.5, 7에 대해 각각 30회, 20회, 10회를 제안하였으며 그 후, 여러 공학자들과 공동연구를 통해 그림 3과 같은 지진기록 분석결과를 연구발표하고 이를 토대로 지진규모별 등가진동재하횟수를 표 1과 같이 제안하였다. 한편, 일본 규정에서는 등가진동재하횟수를 20회로 규정하고 있으며 이는 지진규모 7.5 기준이다.

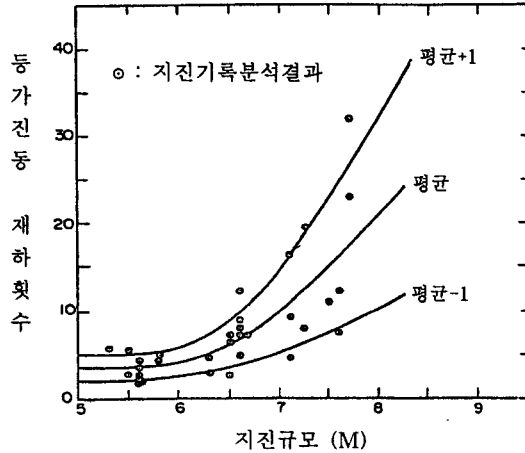


그림 3 지진기록에 기초한 등가진동재하횟수 (Seed et al, 1975)

표 1 지진규모별 등가진동재하횟수(Seed et al, 1975)

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

Seed와 Idriss(1971)는 이러한 내용을 토대로 간편하게 지진에 의한 등가전단응력을 산정할 수 있도록 다음의 식을 제안하였다.

$$\tau_{av} = 0.65 \frac{\gamma h}{g} a_{max} r_d \quad (1)$$

여기서, γh 는 해석대상심도의 전응력, g 는 중력가속도, a_{max} 는 지표면 최대가속도, 그리고 r_d 는 응력감소계수이다. Seed(1988)는 식 (1)의 지표면 최대가속도와 응력감소계수는 지반형태, 지진규모, 그리고 진앙지에서의 거리에 따라 변화하므로 그 결정에 신중을 기해야 함을 언급하였다. 그러나, 여러 국가의 내진설계기준에서는 이용의 편의를 위해 지반형태별 지표면 최대가속도 및 응력감소계수 산정식을 제안하고 있으며 다만, 지반이 매우 연약한 경우에 한해서 지진응답해석의 수행을 권장하고 있다. 국내의 경우, 건설교통부 주관으로 제정된 상위개념의 내진설계기준(건설교통부, 1998)에서 지진가속도에 관한 기준을 언급하고 있다.

2.2 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가방법

보다 세밀한 액상화 평가를 위해서는 지진하중을 고려한 현장시험의 수행이 가장 바람직하나 실제 이 시험의 수행은 거의 불가능함에 따라 대부분의 경우, 일정한 정현하중을 재하하는 실내시험을 이용한다. 특히, 지진연구가 활발한 일본에서는 진동삼축시험 및 진동대시험을 주로 이용하고 있다. 본 연구에서 제안하는 액상화 평가를 위한 진동삼축시험방법은 다음과 같다.

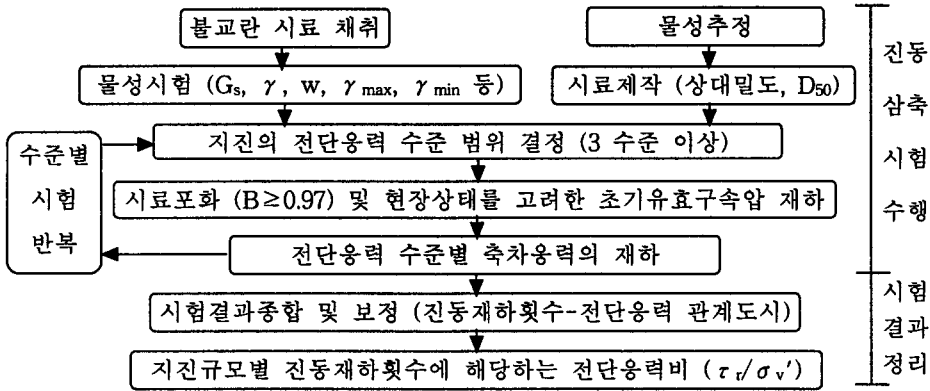


그림 4 액상화 평가를 위한 진동삼축시험방법의 개요

1) 시료의 제작

실내시험은 현장시험이 어려운 경우에 수행하는 것으로 무엇보다도 현장상태를 그대로 재현할 수 있도록 시료를 제작하는 것이 중요하다. 그러나, 액상화 평가를 위한 진동삼축시험의 경우, 불교란 사질토의 채취가 매우 어려울 뿐 만 아니라 큰 경제적 부담이 소요된다. 따라서, 흙의 상대 밀도 및 입도를 토대로 시료를 재성형하여 시험을 수행하는 것이 일반적이다.

2) 시험조건

액상화 평가를 위한 실내시험조건에는 우선적으로 간극수압의 발생을 위한 시료의 포화를 들 수 있다. 진동삼축시험에서는 우선적으로 수중침강법으로 시료를 포화시킨 후, B값을 검토함으로써 시료의 포화도를 검사한다. 또한, 현장상태를 고려하여 유효구속압을 재하하며 동일한 응력수준을 재하하는 응력제어방식으로 시험을 수행한다.

3) 전단응력비의 범위

진동삼축시험에서는 일반적으로 정현파의 진동하중을 주기적으로 재하하며 응력수준에 따라 액상화 발생시기가 변화한다. 따라서, 일정수준의 지진규모를 고려한 액상화 전단저항응력비는 적정수준의 전단응력비(축차응력의 0.5/초기유효구속압)를 포함한 3회이상의 진동삼축시험을 통해산정된다. 문헌조사를 통해 얻어진 일반적인 액상화 전단응력비 수준은 0.15~0.25의 범위이므로 이를 포함하여 전단응력비의 범위를 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4) 시험결과의 보정

진동삼축시험에서는 지진 및 현장상태의 표현을 위해 몇 가지 가정사항을 선정하고 시험을 수행하므로 이를 고려하기 위한 시험결과의 보정작업이 필요하다. 일본 항만연구소의 액상화 관련 핸드북에 언급된 Seed 보정방법의 내용을 요약하면 다음의 표 2와 같다.

표 2 Seed 보정방법 (일본 항만연구소, 1997)

보정방법	보정계수 범위	비 고
$C_r \times (\tau_v / \sigma_v')$ C_r : 보정계수	0.57($K_0=0.4$) ~ 0.9($K_0=1.0$)	K_0 : 정지토압계수 ($K_0=1-\sin \phi$, ϕ : 내부마찰각) 사질토 $\phi = 30 \sim 40^\circ$, 포화사질토 $\phi = 0^\circ$

5) 액상화 전단저항용력비 산정

진동삼축시험결과를 토대로 액상화 전단저항용력을 산정하는 내용을 도시하면 그림 5와 같다.

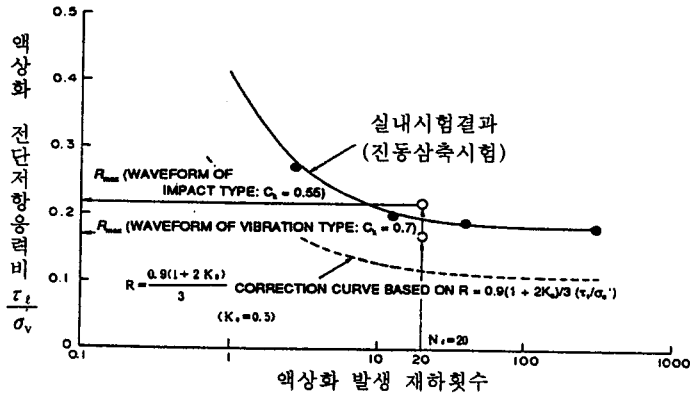


그림 5 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가 예 (일본 항만연구소, 1997)

그림 5는 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가시 Ishihara의 방법을 토대로 평가를 수행한 예이다. 그림의 내용을 살펴보면, 우선 4회의 진동삼축시험이 수행된 결과는 실선으로 표현되었으며 점선은 시험결과를 보정한 내용을 나타내고 있다. 다만, 일본에서는 지진규모 7.5에 해당하는 액상화 발생재하횟수를 20회로 규정화하고 있음에 따라 충격형과 진동형 지진파형에 대한 보정후의 최종 결과는 백색원으로 표현된 바와 같다. 이러한 일련의 내용을 국내에 적용하는 경우, 지난 1세기동안 지진규모 6이상의 지진이 발생한 예가 없는 점을 고려하여 발생예상 지진규모와 함께 액상화 발생 재하횟수를 감소시킴으로써 액상화 전단저항용력비 수준을 높이는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 국내 지진규모를 고려하여 발생예상 최대지진규모를 6.5로 정하고 이에 대한 고려가 가능한 Seed의 이론(표 1 및 그림 3)을 참조하여 액상화 발생 재하횟수를 10회로 선정하였다.

3. 진동삼축시험 및 결과 분석

본 연구에서는 주문진 표준사를 대상으로 그림 4에 나타난 시험과정을 거쳐 진동삼축시험을 수행하였다. 본 시험에 이용된 장비는 C. K. Chan에 의해 고안된 것이며 시험시료의 형상은 원주형으로 직경 50mm, 높이 100mm이다. 표 3은 시험시료의 기본물성 및 시험시 제반조건을 나타내고 있으며 특히, 지진의 진동수와 가장 유사한 1Hz로 시험을 수행하였다.

표 3 시험시 제반조건

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

본 연구에서는 전단용력비를 3수준 이상으로 변화시켜 시험을 수행하였으며 진동삼축시험의 개략적인 순서 및 수중침강법에 의한 시료제작과정을 도시하면 다음의 그림 6 및 그림 7과 같다.

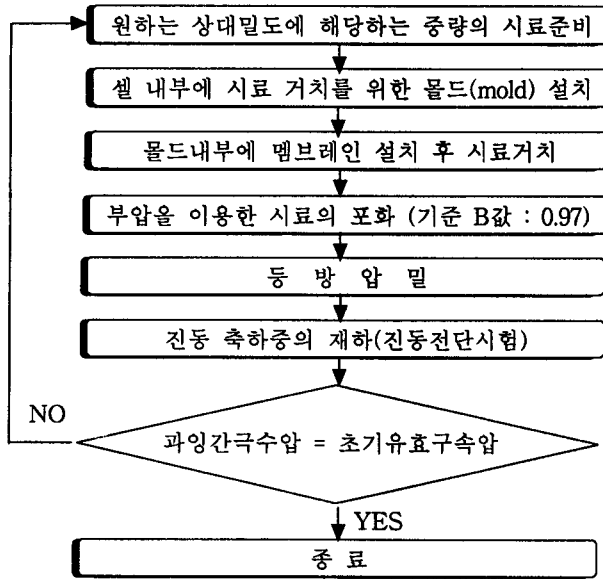


그림 6 진동삼축시험과정 개요도

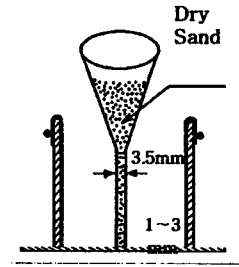


그림 7 수중침강법(Ishihara, 1996)

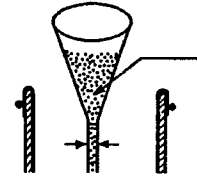


그림 6에 나타난 진동삼축시험과정은 크게 네 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째 단계는 시료의 준비과정으로 원하는 상대밀도의 시료를 셀에 거치시키는 과정으로 본 시험에서는 그림 7의 수중침강법(water sedimentation method ; Ishihara, 1996)을 이용하였다. 두 번째 단계는 시료의 포화 단계이다. 시료의 포화방법은 배압포화법을 사용하였으며, 압력의 증분은 30kPa를 사용하였으며 시료에 무리가 없도록 부압을 서서히 증가시켰다. 이 때, 시료의 완전포화에 대한 확인은 간극수압계수, B값이 0.97이상인 경우로 정하였다. 세 번째 단계로 완전포화된 시료에 등방압밀과정을 통해 체적변형률이 일정해지는 시기까지 압밀과정을 수행하였다. 네 번째 단계는 완전포화된 시료에 축하중을 반복적으로 가하는 단계이다. 이와 같은 시험과정을 통해 진동하중에 대한 포화 모래시료의 간극수압, 변위, 응력-변형률 관계에 관한 자료가 획득된다.

본 연구에서는 표 3에 나타난 바와 같이 상대밀도 50%와 60%의 2가지 경우에 대해서 시험을 수행하였으며 각각의 경우, 유효구속압에 대한 전단응력의 비를 3~5 수준으로 변화시켰다. 진동삼축시험결과, 전반적인 진동재하회수별 간극수압의 변화를 다음의 그림 8과 같으며 이 때, 액상화 발생시기는 진동하중으로 유발된 간극수압이 초기유효구속압과 같아지는 시점으로 정하였다.

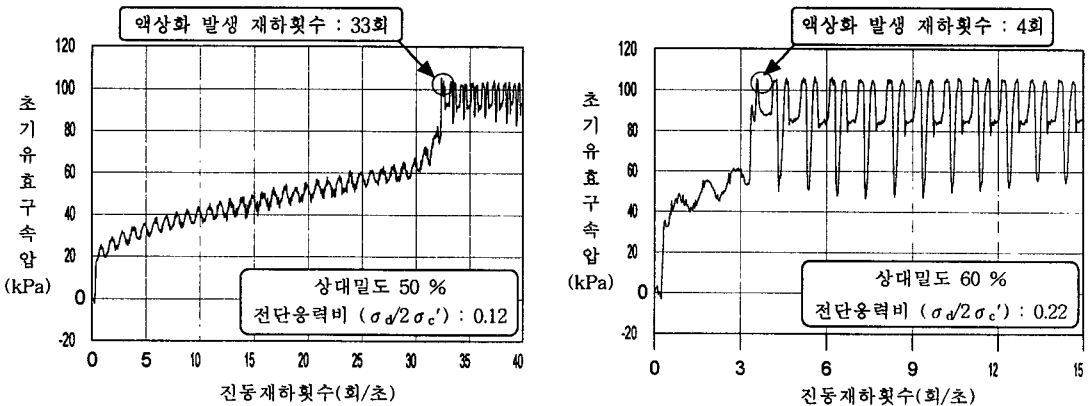


그림 8 진동삼축시험결과 예 (시간에 따른 간극수압의 변화)

시험결과를 종합하여 액상화 발생 진동재하횟수와 전단응력비 관계를 도시하면 그림 9와 같다.

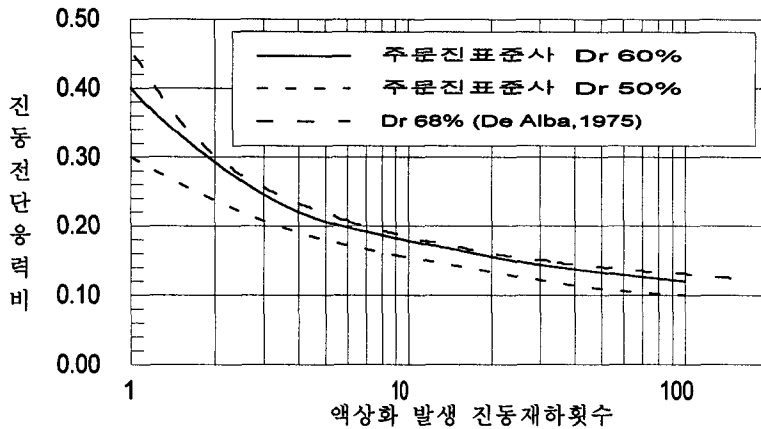


그림 9 진동삼축시험결과 종합 및 실내시험결과 비교

그림 9는 주문진 표준사를 대상으로 한 진동삼축시험결과와 매우 큰 크기의 불교란 Monterey 모래를 대상으로 단순전단시험(Simple Shear Test)결과를 비교하고 있다. 이 때, 유효구속압은 100kPa과 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 거의 동일한 수준이다. 시험결과, 전반적으로 비슷한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한, 현장상태 및 시험시 가정사항에 대한 고려를 위해 진동삼축시험의 결과를 표 2의 Seed의 방법에 기초하여 보정한 결과는 다음의 그림 10에 나타난 바와 같다.

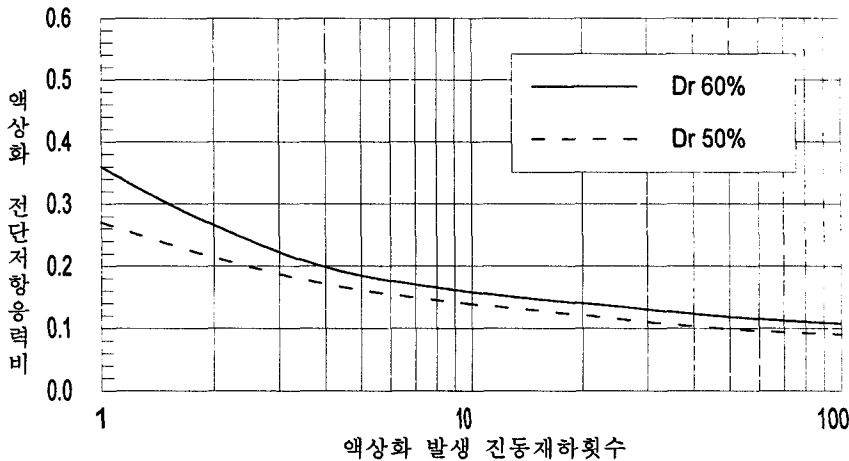


그림 10 진동삼축시험에 기초한 액상화 전단저항응력비의 산정

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(ϕ)을 0° 로 가정하고 Jacky의 식($=1-\sin \phi$)에 적용하여 산정하였다. 최종결정된 액상화 전단저항응력비는 다음과 같다.

표 4 최종 결정된 액상화 전단저항응력비

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

4. 결론 및 향후 연구계획

본 연구에서는 지진자료가 부족한 국내 현실을 고려하여 주문진 표준사를 대상으로 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 내용은 다음과 같다.

- 1) 문헌연구를 통해 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가방법을 체계적으로 정립하고 이를 국내 실정에 맞도록 수정 보완
 - 지진규모가 다소 작은 국내 현실을 고려할 수 있는 Seed의 이론을 기초로 한 평가방법 정립
 - 정현파의 진동하중은 0.1~0.25를 포함한 범위
 - 국내 발생예상 최대지진규모 6.5 기준시 액상화 발생재하횟수 10회 선정.
- 2) 국내 주문진 표준사를 대상으로 한 진동삼축시험의 수행 및 이를 기초로 한 액상화 전단저항 응력비 산정
 - 상대밀도 및 전단응력비 수준을 변화
 - 문헌에 나타난 실내시험결과와 비교하여 매우 신뢰성이 높은 결과 획득

본 연구를 통해 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가가 신뢰성이 높음을 확인하였으며 특히, 지진자료가 부족한 국내 여건과 지진활동이 활발하지 않은 지진특성을 감안할 때, 이러한 실내시험을 통한 지진연구가 국내의 적용성 검토 및 연구의 신뢰성 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

앞으로 상대밀도, 세립질 함유량, 입도분포, 입자의 형상 등 액상화 영향인자변화에 따른 실내시험의 수행과 함께 문헌연구를 병행함으로써 심도있는 액상화 연구뿐 만 아니라 국내 공학기술자들이 편리하게 이용가능한 액상화 평가기준이 마련될 것으로 기대된다.

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.

참고문헌

1. S. L. Kramer(1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, pp.348-422.
2. Port and Harbour Research Institute(1997), "Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land", A. A. Balkema.
3. K. Ishihara(1996), "Soil Behavior in Earthquake Geotechnics", Clarendon Press, Oxford.
4. H. B. Seed, and I. M. Idriss(1967), "Analysis of Soil Liquefaction Niigata Earthquake", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.93, No.3, pp.83-108.
5. H. B. Seed, and I. M. Idriss(1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.97, No.9, pp.1249-1273.
6. H. B. Seed, and I. M. Idriss, F. Makdisi, and N. Bamerjee(1975), "Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analysis", EERC, UCB, EERC-75/29.
7. P. De Alba, H. B. Seed, and C. K. Chan(1976), "Sand Liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.102, No.9, pp.909-927.
8. H. B. Seed(1988), "Liquefaction Potential of Sand Deposits under Low Levels of Excitation", EERC, UCB, EERC-88/11.
9. 건설교통부(1997), "내진설계기준 개발 연구(Ⅱ)", pp.29-41.