

## 정현하중재하 진동삼축시험에 기초한 포화사질토의 액상화 한계저항특성

### A Critical Liquefaction Resistible Characteristic of Saturated Sands Based on the Cyclic Triaxial Test Under Sinusoidal Loadings

최 재 순<sup>1</sup> Choi, Jae-Soon

김 수 일<sup>2</sup> Kim, Soo-Il

#### Abstract

Laboratory dynamic tests are carried out to assess the liquefaction potential of saturated sands in most countries. However, simple results such as the maximum cyclic shear stress and the number of cycles at initial liquefaction are used in the experimental assessment of liquefaction potential, even though various results can be obtained from the dynamic test. In addition, it seemed to be inefficient because more than three dynamic tests with different stress ratio have to be carried out to draw a liquefaction resistance experimental curve. To improve the present assessment method for liquefaction potential, a new critical resistible characteristic for soil liquefaction is proposed and verified through conventional cyclic triaxial tests with Jumunjin sand. In the proposed method, various experimental data such as effective stress path, stress-strain relationship, and the change of excess pore water pressure can be used in the determination of cumulative plastic shear strains at every 1/4 cycle. Especially, the critical cumulative plastic shear strain to initiate liquefaction can be defined in a specific point called a phase change point in the effective stress path and it can be calculated from a hysteric curve of stress-strain relationship up to this point. Through this research, it is found that the proposed cumulative plastic shear strain can express the dissipated energy to resist dynamic loads and consider the realistic soil dynamic behavior of saturated sands reasonably. It is also found that the critical plastic shear strain can be used as a registible index of soils to represent the critical soil dynamic state, because it seems to include no effect of large deformation.

#### 요 지

국내 액상화 상세평가에 관한 시방내용을 살펴보면, 지진을 정현하중으로 고려한 등가전단응력개념에 기초하여 전단응력을 달리한 3회 이상의 액상화 발생 실내진동시험을 수행하고 이를 토대로 액상화 저항응력비 곡선을 도시하여 지진규모별로 적용할 것을 명시하고 있다. 즉, 현행 액상화 상세평가에서는 실내진동시험결과인 응력, 변형률, 과잉간극수압, 유효응력, 응력경로의 변화 등의 다양한 결과들을 효과적으로 이용하지 못하고 최대전단응력과 액상화 발생시 진동재하횟수라는 단순한 시험결과만을 이용하여 액상화 평가를 수행한다. 본 연구에서는 현행 액상화 상세평가에서의 단순한 시험결과의 이용을 탈피하여 응력, 변형률, 그리고, 과잉간극수압 시간이력들과 응력-변형률 상관관계 및 유효응력경로 등의 다양한 실내진동시험 결과를 토대로 액상화 발생메카니즘을 포함한 지반의 동적저항상태를 분석하였다. 특히, 과잉간극수압의 영향을 고려한 동적 유효응력경로가 지반의 동적거동을 효과적으로 구분하여 나타낼 수 있는 점을 발견하고 이를 토대로 지반의 동적상태를 점진적 응력감소, 급진적 응력감소, 그리고 액상화 후

1 정희원, 교토대학교 방재연구소 지반재해연구부 박사후연구원 (Member, Post-Doc., Division of Geo-disaster, Disaster Prevention Research Institute in Kyoto Univ., geocjs@geotech.dpri.kyotop-u.ac.jp)

2 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., Korea)

극한상태의 3단계로 구분하였다. 또한, 액상화 현상이 실제적으로 점진적 응력감소에서 급진적 응력감소로 전환되는 시점에서 대변형을 동반하여 발생한다는 사실을 발견하고 이를 액상화 상태전환시점으로 정의하였으며 이러한 액상화 상태전환시점이 압축-제하 또는 인장-제제하로 하중방향이 바뀌는 시점에서 발생하는 점을 반영하여 1/4주기별 시험결과분석에 기초하여 저항특성을 나타내었다. 그리고, 본 연구를 통해 제안된 액상화 저항특성에 대한 타당성 검토를 위해 과잉간극수압으로 인해 발생하는 지반재료 내부에서 소산되는 에너지 개념과 기제안된 교란상태개념에 기초한 액상화 저항특성과 비교하였다. 연구결과, 제안된 누적 소성 전단변형률은 액상화 발생의 원인이 되는 과잉간극수압의 영향을 합리적으로 표현하고 있을 뿐만 아니라 진동하중으로부터 소산되는 재료 내부의 에너지 변화를 신뢰성 높게 표현하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 제안된 지반의 한계 저항특성의 경우, 기제안된 교란도 함수에 기초한 수치해석방법보다 정확하게 대변형의 영향을 포함하지 않고 한계상태를 표현하고 있는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Cumulative plastic shear strain, Dissipated energy, Liquefaction initiation, Phase change point

## 1. 서론

지반의 액상화 평가는 실제적인 구조물 및 기초지반 내진설계에 앞서 수행하는 것으로 통상적으로 지진에 의한 액상화 발생특성과 지반의 동적저항특성을 비교하여 안전율을 산정하게 되며 이때, 대부분의 액상화 평가시 등가전단응력개념(Seed 등, 1971)의 이용이 일반적이다. 여기서, 지진의 액상화 발생특성은 불규칙한 지진을 소정의 진폭을 보유한 정현하중으로 고려하고 지반의 동적저항특성은 경험적 지진피해자료 및 실내진동시험에 기초하여 산정하게 된다. 현행 국내 시방내용을 보면, 1997년이후 구조물별 내진설계기준이 새롭게 보완된 이후, 예비평가, 간이평가, 그리고 상세평가로 구분된 내용이 주를 이루고 있다. 이때, 예비평가는 지반조사자료를 토대로 액상화 평가대상지층을 선정하게 되며 간이평가와 상세평가는 시설물 중요도 및 지역별 지진특성을 고려하여 결정된 설계지반운동수준에 준하여 지진에 의한 전단응력비를 산정하고 지반의 저항특성은 경험적 지진피해자료를 토대로 제안된 표준관입 저항치 이용의 저항응력비 산정곡선 또는 실내진동시험으로 도출된 저항응력비 산정곡선에 기초하여 산정된다. 이때, 등가전단응력개념에 기초하여 제안된 지진 규모 보정계수(magnitude scaling factor) 및 지진규모별 등가진동재하횟수가 적용되어 최종 지반의 액상화 저항응력비가 산정된다. 현재, 국내에는 액상화 피해자료가 전무한 상태로 저항응력비 산정곡선 이용시 지진규모에 대한 고려가 가능한 Seed 등(1983)의 연구결과를 이용하고 있다.

최근, 등가전단응력개념에 기초한 기존의 평가법이

간편한 대신, 실제 지진 및 지반특성을 정확하게 반영하고 있지 못하다는 여론이 크게 주목을 받고 있으며 이와 더불어 여러 연구자들이 액상화 발생원인인 비배수조건에 과잉간극수압을 정확하게 예측할 수 있는 유효응력 개념의 동적 예측기법을 개발하는데 많은 연구를 집중시키고 있다. 특히, 액상화 저항특성에 관한 연구와 관련하여, 재료역학적 관점에서 진동하중을 받는 포화사질토 내부의 거동변화를 소산에너지(Okada와 Nemat-Nasser, 1994), 소성 일(Iai 등, 1992), 그리고, 재료내부의 교란(Desai, 1992) 등을 이용하여 평가한 이론들이 제안된 바 있다. 국내의 액상화 관련 연구사례를 살펴보면, 경험적 액상화 평가법 개발에 관해서는 검증할 자료가 충분하지 못하기 때문에 국내에 적합한 지진 규모 보정계수(심재욱 등, 2002)에 대한 연구와 같이 미국 및 일본의 시방내용 인용시 중약진 지진특성의 국내 적용을 위한 연구에 주로 매진하고 있으며 실내진동시험을 통해 국내 지반의 동적특성 및 지진특성을 분석하려는 연구에 더 많은 관심이 집중되고 있으며 최근에는 실지진하중재하가 가능한 고가의 실내진동시험장비도 도입되어 심도있는 연구가 진행되고 있다. 그러나, 대부분의 연구들이 기존의 등가전단응력개념을 대체할만한 수준의 연구성과를 획득하지 못하고 있으며 실지진하중재하의 실내시험의 경우, 막대한 비용 및 시간의 과다소요로 인해 연구용으로만 이용될 뿐 실제 내진설계에서는 정현하중재하의 실내진동시험을 이용하고 있는 실정이다.

본 연구에서도 이러한 실정을 최대한 반영하여 정현하중을 이용한 실내진동시험결과로부터 획득가능한 변형률 및 과잉간극수압 시간이력, 응력-변형률 상관관계,

그리고, 유효응력경로 등의 다양한 시험결과에 대한 분석을 통해 기존의 등가전단응력개념을 탈피한 새로운 개념의 액상화 저항특성을 제안하고자 하며 이에 대한 타당성 검토를 위해 최근 연구동향과 비교분석하고자 한다.

## 2. 진동하중을 받는 지반의 액상화 저항특성

### 2.1 등가전단응력개념에 기초한 지반의 액상화 저항 특성

국내 액상화 상세평가에 대한 시방내용을 살펴보면, 그림 1과 같이 요약하여 설명할 수 있다.

그림 1의 내용을 보면, 3회 이상의 액상화 발생 진동 시험결과 중 각 시험별 최대진동하중과 액상화 발생 재하횟수와 상관도를 도시한 후, 현장에 대한 보정을 통해 최종적으로 액상화 저항특성곡선을 결정하게 된다. 등가진동 재하횟수는 표 1에 나타난 바와 같이 자국의 설계지진규모를 고려하여 제안된 지진규모별 등가진동 재하횟수(Seed 등, 1983)를 이용하여 결정되는데, 국내에서는 한시적으로 지진규모 6.5를 설계지진규모로 정하고 있다. 여기서, 등가진동 재하횟수는 최대지진하중의 65%수준의 정현하중을 기준으로 결정된 것으로 지진규모 6.5 기준시 등가진동 재하횟수는 10회이다.

이상의 내용에 나타난 바와 같이, 기존의 상세평가에서는 최대축차응력과 액상화 발생 재하횟수라는 단순한 시험결과만을 액상화 저항특성의 결정에 이용하고 있다. 이 또한 기존의 평가법이 등가전단응력개념에 기

초하여 개발됨에 따른 것으로 비배수조건인 실내진동 시험으로부터 획득되는 응력, 변형률, 과잉간극수압, 그리고 응력경로 등 다양한 시험결과를 효율적으로 이용할 수 없다. 그러므로, 평가법의 발전을 위해서는 등가전단응력개념을 대신 할 새로운 평가이론의 도입이 필요하며 이때, 불규칙한 지진의 다양한 특성도 함께 고려되는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 기존의 등가전단응력개념에서 완전히 탈피하여 범용적으로 수행되고 있는 실내진동시험의 결과를 충분히 활용하여 지반의 동적저항특성을 합리적으로 결정하는 새로운 개념의 액상화 저항특성을 제안하고자 한다.

### 2.2 유효응력개념을 이용한 지반의 액상화 저항특성

액상화 발생의 원인이 되는 과잉간극수압의 영향을 고려한 대표적인 해석이론으로 소성일개념(shear work theory)에 기초한 이론, 소산에너지개념(dissipated energy concept), 그리고, 교란상태개념(disturbed state concept)을 들 수 있다. 소성일개념과 소산에너지개념은 용어상의 차이가 있을 뿐 응력-변형률 이력곡선 내부면적이 과잉간극수압의 발생에 기여한다는 기본개념은 동일하다. Iai 등(1992)은 소성일개념에 기초하여 액상화 저항특성을 제안하였는데 액상화 발생시 진동하중 하의 과잉간극수압과 소성일과의 상관관계는 그림 2(a)에 나타난 바와 같다. 또한, 액상화 발생시점을 기준소성일의 40% 지점을 지나는 상태변환선(phase transformation line)을 통해 결정하고 이전의 거동을 그림 2(b)와 같이 액상화 전(liquefaction front) 상태로 정의하였다.

교란상태개념은 진동하중하의 포화사질토의 거동이 동역학적인 소성연화거동에 지배를 받는다는 점에 기초하고 있다. 교란상태개념은 재료가 상대적으로 손상되지 않은(relative intact; RI) 상태와 완전파괴(fully adjusted; FA)된 상태의 2가지 기준상태 내에서 실제 진동하중을 받는 재료의 거동은 초기 외부의 영향을 받지 않은 상태(RI)로부터 외부하중으로부터 발생하는 재료내부의 미세구조 자체조정에 의해 점차적으로 파괴상태(FA)로 진행한다고 정의하는 이론으로 액상화를 포함한 포화사질

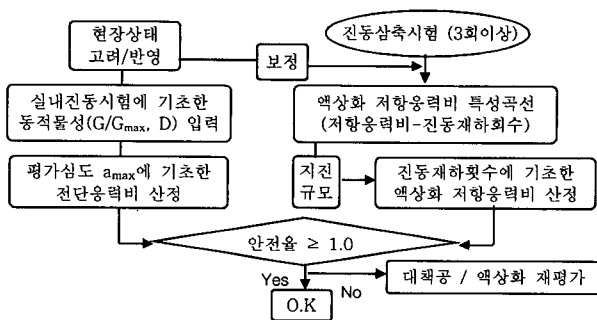


그림 1. 기존의 액상화 상세평가 모식도(김수일 등, 2004)

표 1.  $0.65\tau_{max}$  정현하중에 대한 지진규모별 등가진동 재하횟수(Seed 등, 1983)

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

토의 연화거동을 위해 개발된 이론이다. 교란상태개념을 개발한 Desai(1992)는 포화사질토의 동적거동에 기인한 교란도를 식 (1)과 같이 정의하였으며 Park(1997)은 교란상태개념을 이용한 수치해석기법을 개발하고 이를 실삼축시험결과를 통해 규명한 바 있으며 이와 함께 지반-구조물 상호작용에 있어서 토체와 상호접촉면의 진동하중에 관한 거동을 교란상태개념으로 설명하는 연구를 수행하였다.

$$D = \frac{\sigma'^{(i)} - \sigma'^{(a)}}{\sigma'^{(i)} - \sigma'^{(c)}} = \frac{\tau^{(i)} - \tau^{(a)}}{\tau^{(i)} - \tau^{(c)}} \quad (1)$$

여기서, 윗 첨자 i, c, 그리고 a는 각각 RI상태, FA상태, 그리고 시료의 실제거동상태를 표시하며,  $\sigma'$ 는 평균유효응력이고  $\tau$ 는 평균전단응력이다.

교란상태개념을 응력-변형률 관계를 이용하여 설명하면 그림 3과 같다.

또한, 포화사질토 및 포화점성토에 대한 여러 실내진동시험을 통해서 재하횟수별로 식 (1)에 나타난 바와 같

이 응력변화에 따른 교란도와 응력-변형률 상관도로부터 산정한 소성변형의 누적량을 표현하는 매개변수, 전단 소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strain trajectory)의 관계가 그림 4와 같음을 밝히고 이에 관한 상관식을 식 (2)와 같이 정의하였다.

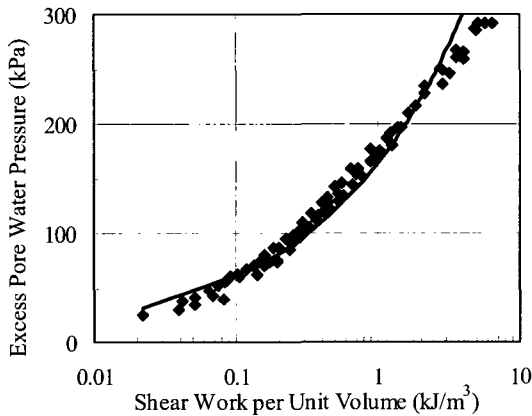
$$D = D_u(1 - e^{-A\xi_D^Z}) \quad (2)$$

여기서, A, Z 그리고  $D_u(=0.99)$ 는 재료의 매개변수이며,  $\xi_D$ 는 전단 소성변형률 상각궤도로 응력-변형률 상관관계를 통해 1/2사이클별로 결정된 전단 소성변형률을 누적하여 산정되며 그 산정식은 식 (3)과 같다.

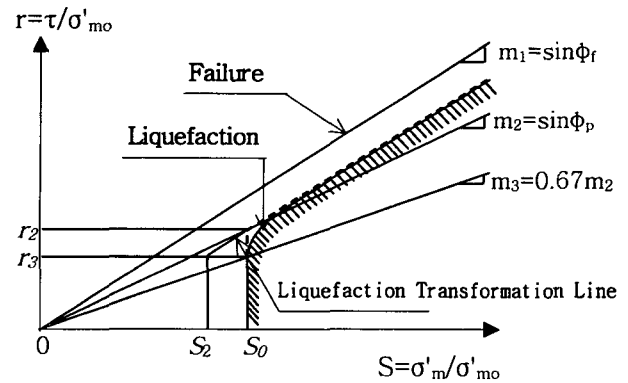
$$\xi_D = \int d\xi_D = \int \sqrt{dE_{ij}^p dE_{ij}^p} \quad (3)$$

(여기서,  $dE_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^p - \frac{1}{3} d\epsilon_v^p$ )

여기서,  $dE_{ij}^p$ 는 전단 소성변형률 증분이고  $d\epsilon_{ij}^p$ 와  $d\epsilon_v^p$ 는 소성변형률 증분과 체적 소성변형률 증분을 나타낸다.



(a) 소성일-과잉간극수압 상관관계



(b) 액상화 전상태(liquefaction front state)

그림 2. 소성일개념에 기초한 액상화 저항특성(lai 등, 1992)

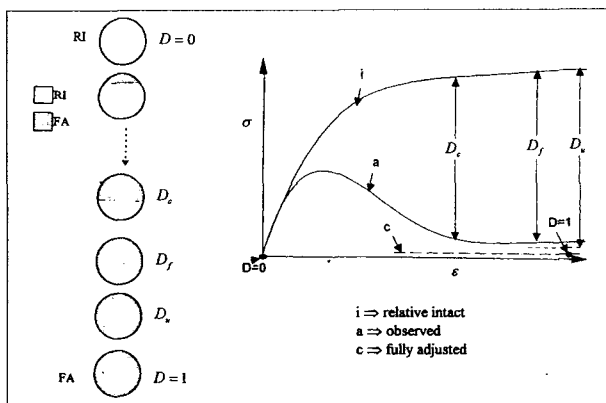


그림 3. 응력-변형률 관계도상의 교란도(Park, 1997)

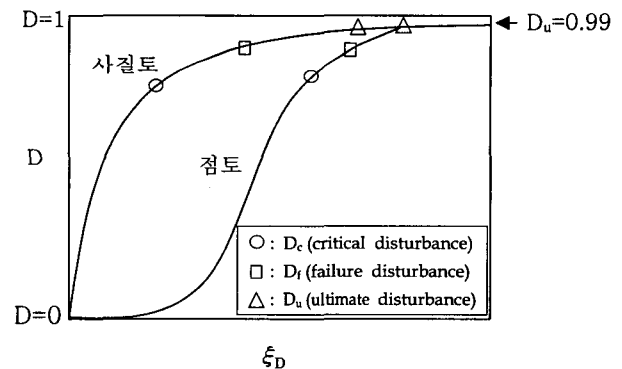


그림 4. 교란도 함수의 도식적인 형태(최재순과 김수일, 2003)

이 때, 비배수조건으로 체적 소성변형이 발생하지 않으므로 각축 방향별 탄성계수를 이용하여 산정된 각축 방향별 소성변형률을 이용하여 전단 소성변형률 상각계도를 산정하게 된다. 이상의 전단 소성변형률 상각계도를 산정하는 방법을 그림으로 요약하여 나타내면 그림 5와 같다. 본 연구에서는 실제적으로 비배수상태시 전단변형만이 발생하는 특성을 고려하여 기존의 축응력-축변형률 3축시험결과를 통해 결정된 전단 소성변형률 상각계도의 명칭을 전단응력-전단변형률 상관관계에 기초하여 전단변형률 누적 소성 전단변형률,  $\xi_{\gamma}$ (cumulative plastic shear strain)로 정의하였다.

교란상태개념에 기초하여 액상화 현상을 토립자의 미세구조 측면에서 재료 입자간의 접촉을 통해 외부하중을 지지하던 미세구조가 완전히 무너지고 물이 하중을 전달하게 되며 미세구조는 급격한 변화를 겪게 되는 것으로 간주하고 액상화 발생시점을 교란도의 변화가 가장 급격히 나타나는 시점으로 정의하게 되는데, 그림 4에 나타낸 바와 같이 교란도의 변화를 나타내는 교란도 함수의 최대곡률에서 물리적으로 재료내부의 교란도의 변화가 가장 급격한 한계교란도(critical disturbance ;  $D_c$ )

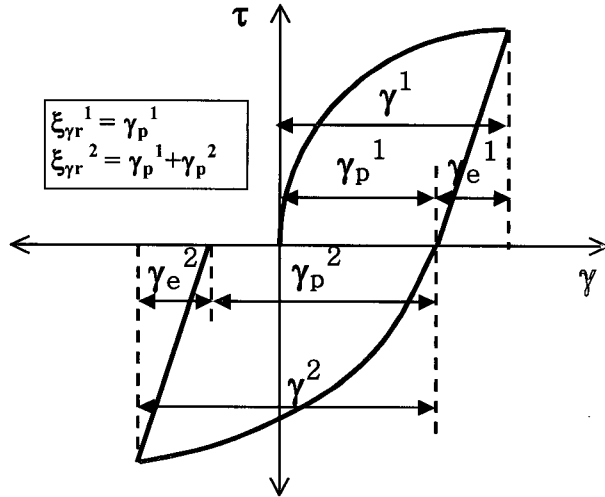


그림 5. 누적 소성변형률 산정모식도(김수일 등, 2004)

표 2. 실내진동시험시 시료 및 시험조건(주문진 표준사)

시료조건	지반물성 및 시료조건	구분	시험조건
평균입경	0.208mm	제어방식	응력제어
최대건조단위중량	1.60g/cm <sup>3</sup>	진동수	0.1Hz
최소건조단위중량	1.39g/cm <sup>3</sup>	진동응력비	0.18 ~ 0.33
상대밀도(%)	40, 50, 60%	배수조건	포화비배수
시료성형	수중침강	초기유효구속압	60, 100, 150kPa

로 정의할 수 있다.

Park(1997) 및 김경환 등(1998)이 주문진 표준사를 대상으로 한 진동삼축시험을 통해 교란도 함수의 최대곡률을 이용하여 포화사질토의 액상화 발생시 진동재하횟수를 신뢰성 높게 표현할 수 있음을 발표한 바 있으며 이용된 교란도 함수의 곡률산정식은 다음과 같다.

$$R = \frac{D''}{(1 + D'^2)^{3/2}} \quad (4)$$

여기서,  $D'$  과  $D''$  은 식 (2)의 교란도 함수에 대한 1, 2차 미분항으로 다음과 같다.

$$D' = \frac{dD}{d\xi_D} = 0.99 \times AZ\xi_D^{Z-1} \text{Exp}(-A\xi_D^Z) \quad (5)$$

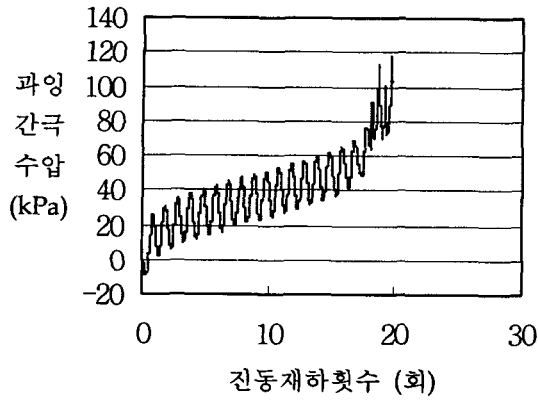
$$D'' = \frac{d^2D}{d\xi_D^2} = 0.99 \times AZ\xi_D^{Z-2} \text{Exp}(-A\xi_D^Z)(Z-1 - AZ\xi_D^Z) \quad (6)$$

### 3. 진동시험에 기초한 액상화 저항특성 규명

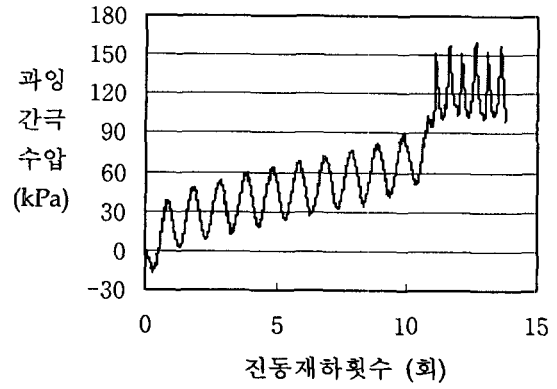
#### 3.1 실내진동시험의 수행

본 연구에서는 다양한 진동삼축시험 결과로부터 액상화 저항특성을 분석하기 위해 주문진 표준사를 대상으로 진동삼축시험을 수행하였다. 표 2는 재성형된 시료의 기본물성 및 시험조건을 나타낸 것이다.

그림 6, 7, 8은 상대밀도 40% 재성형시료에 대해 유효구속압 100 kPa과 150 kPa 기준으로 유효구속압에 대한 전단응력비를 0.18과 0.22에 맞추어 진동삼축시험을 수행한 결과를 나타낸 것이며 각 시험에서 액상화 발생 진동재하횟수는 18회와 11회이다. 그림 7의 가로 및 세로축에 나타난  $J_1$ 과  $J_{2D}$ 의 산정식은 식 (7) 및 식 (8)과 같으며 그림 8에서 전단응력 및 전단변형률 상관관계는 축축응력-축변형률 상관관계를 탄성론에 기초하여 전환시켜 나타낸 것이다.

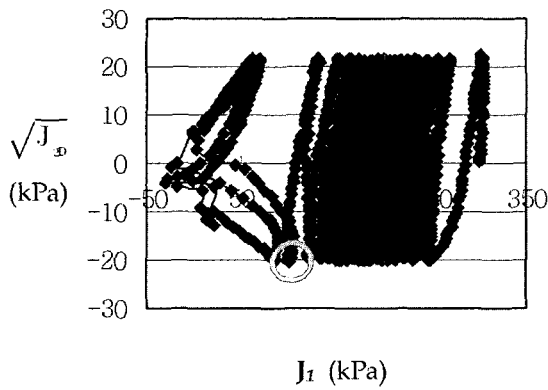


(a) 초기유효구속압 100kPa

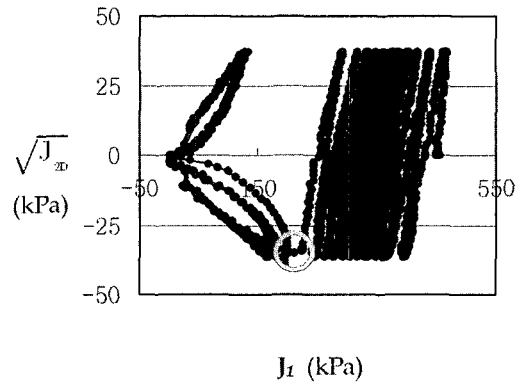


(b) 초기유효구속압 150kPa

그림 6. 동적 과잉간극수압 변화(상대밀도 40%)

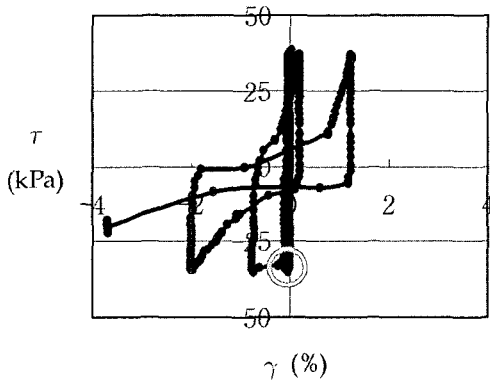


(a) 초기유효구속압 100kPa

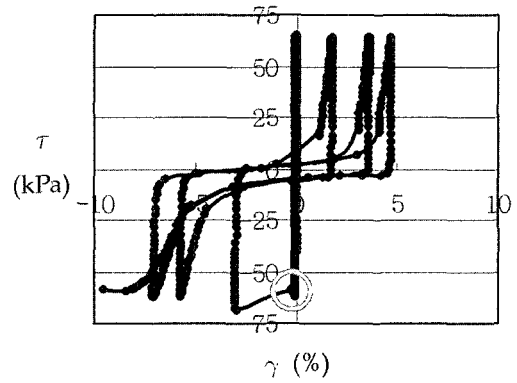


(b) 초기유효구속압 150kPa

그림 7. 동적 유효응력경로(상대밀도 40%)



(a) 초기유효구속압 100kPa



(b) 초기유효구속압 150kPa

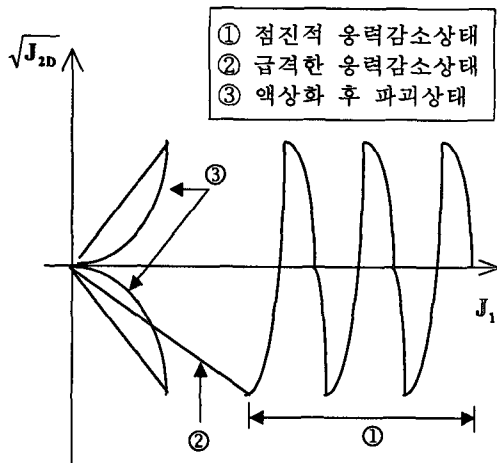
그림 8. 동적 응력-변형을 상관관계(상대밀도 40%)

$$J_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (7)$$

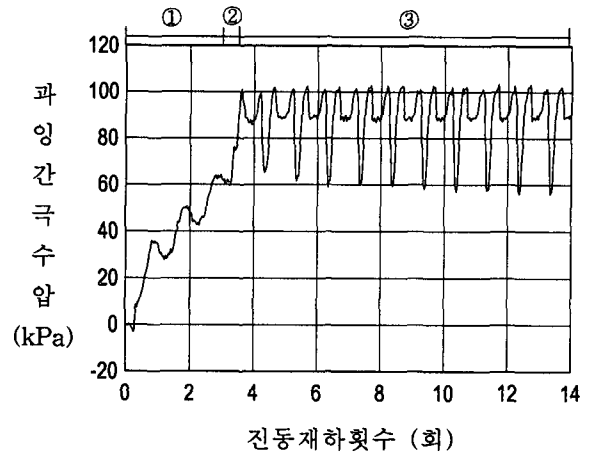
$$J_{2D} = \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2}{6} + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2 \quad (8)$$

### 3.2 액상화 상태변환시점 및 한계 액상화 저항특성치 산정

액상화 발생은 일반적으로 진동하중을 받는 포화사 질토가 유효응력이 완전히 상실( $\sigma' = 0$ )되는 것으로 정의되고 있으며 기존의 교란상태개념에 기초한 방법에서



(a) 유효응력경로



(b) 과잉간극수압

그림 9. 지반의 동적거동에 대한 상태분류(최재순과 김수일, 2003)

는 교란도 함수의 최대곡률점을 통해 액상화 발생시점을 정의하고 있다. 그러나, Iai 등이 제안한 그림 2와 비교하여 그림 6, 7, 8의 진동삼축시험을 분석해 보면, 액상화로의 상태전환은 그림 6, 7, 8에 원으로 표시된 곳에서부터 시작되는 것으로 나타난다. 특히, 이러한 상태전환이 그림 7의 유효응력경로에서 뚜렷하게 발견되는데 이를 기초로 하여 본 연구에서는 지반의 동적상태를 그림 9와 같이 점진적 응력감소, 급격한 응력감소, 그리고 액상화 후 파괴의 3가지 상태로 구분하고 점진적 응력감소에서 급격한 응력감소로 전환되는 점을 액상화 상태전환시점(phase change point)으로 정의하고 이 시점을 액상화 발생시점으로 간주하였다. 특히, 액상화 상태전환시점을 정의한 액상화 상태전환선이 일정한 응력경로상에서 일정한 기울기를 보유한 직선으로 표시되기 때문에 이를 효과적으로 고려하기 위해서는 1주기별 또는 1/2주기별 시험결과를 이용하는 것과는 달리, 압축, 제하, 인장, 재제하 순으로 재하되는 진동특성에 따라 1/4주기별로 시험결과를 분석해야 한다.

현행 등가전단응력개념에 기초한 액상화 상세평가에서는 평가대상지반의 액상화 저항특성이 실험을 통해서 결정된 저항응력비 산정곡선 상에서 지진규모에 따라 결정된다. 그러나, 본 연구에서는 정현하중을 이용한 시험을 통해 재료내부의 동적거동변화가 진동하중크기에 영향을 받지 않는다는 Okada와 Nemat-Nasser(1994) 및 최재순 등(2002)의 연구결과에 기초하여 액상화 저항특성을 지진규모나 정현하중 크기에 관계없이 일정한 지반재료의 고유특성으로 간주하였다.

이상의 내용을 요약하여 본 연구에서 제안하는 액상

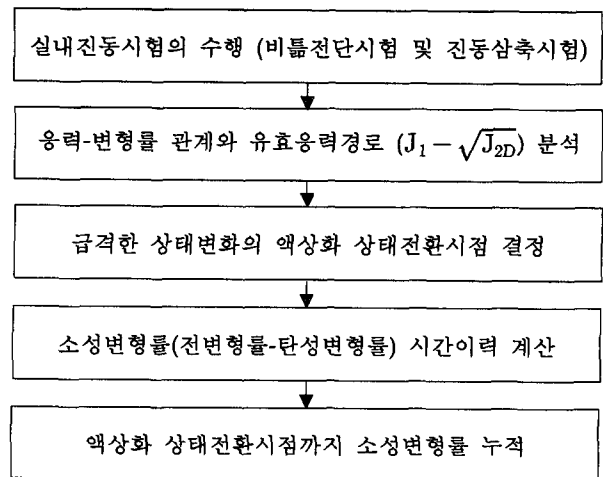


그림 10. 액상화 저항특성치 산정

화 저항특성치인 누적 소성 전단변형률을 산정하는 과정을 나타내면 그림 10과 같다.

### 3.3 탄성 전단변형률 산정을 위한 저변형률에서의 실내 진동시험

본 연구에서 제안된 액상화 저항특성치인 누적 소성 전단변형률은 실내진동시험결과로부터 획득한 변형률 자료를 통해 산정된다. 이 때, 획득한 결과는 전 변형률(total strain)에 해당되므로 이에 대한 탄성 변형률을 감하여 소성 변형률을 산정한다. 여기서, 탄성 변형률은 소정의 방법을 통해서 산정된 탄성계수를 이용하거나 실제 시험자료에서 최대축차응력과 축차응력 0일 때의 변형률의 차를 이용하여 산정하게 된다. 본 연구에서는 탄성 전단변형률의 산정시 탄성계수를 이용하였으며 이

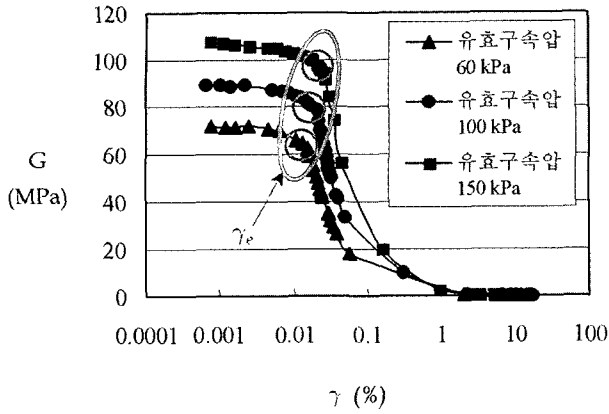


그림 11. 전단탄성계수 변화곡선(상대밀도 40%)

때, 탄성계수는 국내 액상화 상세평가시 변형률 수준에 따른 동적시험이 동반되는 점을 고려하여 변형률수준에 따른 탄성계수변화곡선 상의 탄성 변형률(threshold strain)로 정의하였으며 이 탄성 변형률은 변화곡선 상의 최대곡률점으로 정하였다.

그림 11은 비틀전단시험을 통해 획득된 변형률 수준별 전단탄성계수곡선을 나타내고 있다.

그림 11에서 원표시는 본 연구에서 제안한 탄성 전단 변형률의 값을 나타내고 있다.

#### 4. 비교분석를 통한 제안된 저항특성의 타당성 검토

본 연구에서는 저항특성의 타당성 검토를 위해 에너지 소산법에 기초한 액상화 저항특성과 교란도 함수에 기초한 저항특성을 비교하였으며 소산 에너지 계산시 응력-변형률 상관곡선 내의 면적을 삼각형 및 사다리꼴

면적계산법을 이용하여 산정하였다.

#### 4.1 에너지 소산법에 기초한 액상화 저항특성

액상화 발생메카니즘을 재료역학적으로 살펴보면, 포화사질토가 급속하중을 받아 입자간의 접촉이 무너지면서 토립자가 부담하던 하중을 물이 전적으로 부담하게 되는 상태로 이는 소산에너지의 개념으로도 설명될 수 있다. 외부로부터 가해지는 하중, 즉 에너지는 토립자의 접촉점간의 마찰을 감소시킴으로써 소비되며 토립자의 접촉점간의 마찰이 줄어들에 따라 입자구조는 재배열을 이루며 그 과정에서 유효응력은 감소되며 외부의 하중은 점차로 물이 부담하게 된다. 즉, 액상화 현상은 토립자의 재배열 과정 중의 하나로 볼 수 있으며 이러한 입자구조변화에는 토립자가 보유한 에너지가 소산되게 되고 특히, 시간에 따른 소산에너지의 변화량이 가장 큰 시점에서 초기 액상화가 발생한다고 정의할 수 있다(김경환 등, 1998). 이와 같은 소산에너지 또는 소성일에 대한 물리량은 응력-변형률 이력곡선 내부의 면적을 통해 표현되는데 응력곡선은 불규칙한 곡선함수형태이므로 곡선 내부의 면적은 사다리꼴로 표현하여 이를 합친 면적으로 계산할 수 있으며 이 때, 산정식은 식 (9)와 같다. 또한, 실제 진동시험에서 액상화 발생 이전의 응력곡선은 거의 직선에 가까운 형태를 나타내므로 이를 1/2주기별로 삼각형화하여 내부면적을 산정하기도 한다. 사다리꼴 면적법 및 삼각형 면적법으로 소산에너지를 산정하는 내용을 요약하면 그림 12와 같다.

$$\delta W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\tau_i + \tau_{i+1})(\gamma_{i+1} - \gamma_i) \quad (9)$$

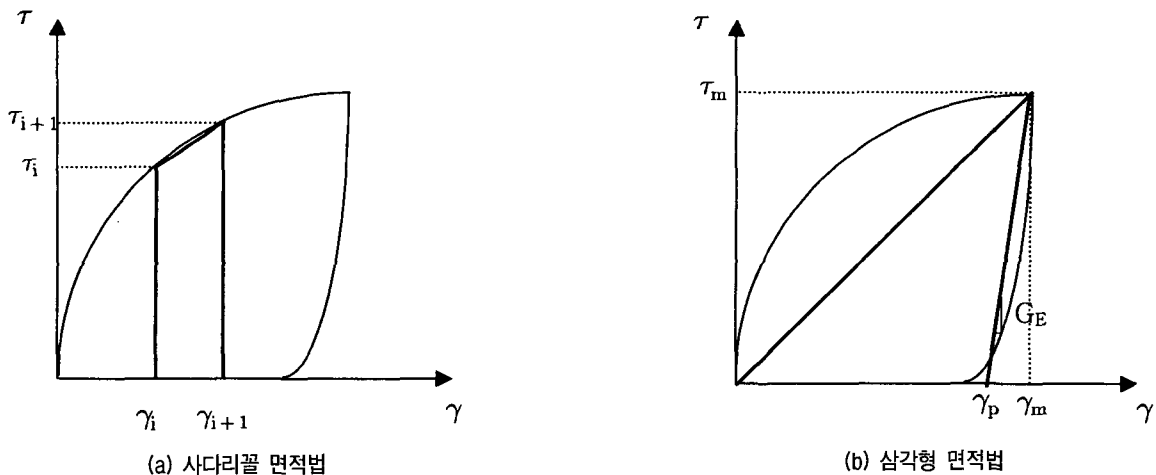


그림 12. 소산에너지 산정모식도



여기서,  $\delta W$ 는 시료에 발생된 단위체적당 축적된 소산 에너지이며 압축 및 인장시에 누적계산된 면적에서 제하 및 재재하시 면적을 감하여 내부면적을 산정하게 된다. 이에 반해 삼각형 면적계산시에는 1/2주기로 소성전단변형률을 우선 결정한 후, 최대전단응력과 소성전단변형률을 통해 삼각형 면적을 계산하게 된다.

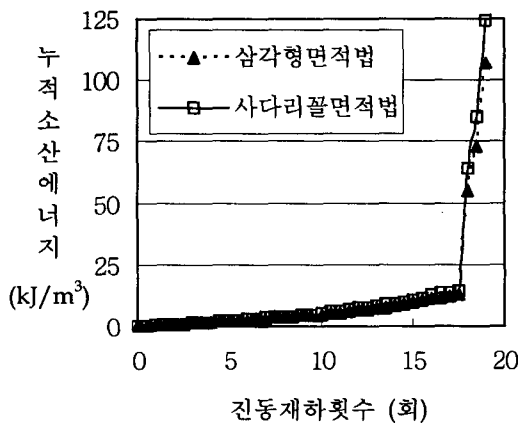
이상의 내용을 기초로 하여 상대밀도 40% 시험시료에 대한 유효구속압 100kPa 및 150kPa 시험결과에 대한 1/2주기별로 소산에너지를 삼각형 및 사다리꼴 면적법으로 산정하여 나타내면 그림 13과 같다.

그림 13에 나타난 바와 같이, 사다리꼴 면적법으로 계산한 값이 삼각형 면적법으로 계산한 값보다 다소 크게 산정된 반면, 전반적인 재하횟수에 따른 변화경향은 동일한 것으로 나타났다. 전반적으로 소산에너지는 액상화 발생 전까지 점진적으로 에너지가 증가하다가 액상화 발생시 급격한 에너지 변화를 보였다. 이는 급격한

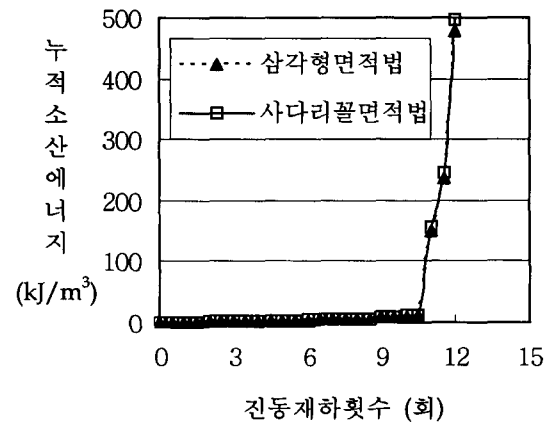
과잉간극수압의 증가와 함께 발생한 액상화로 인해 내부에너지 또한 크게 소산되었기 때문이다.

소산에너지와의 비교를 위해 본 연구에서 제한한 저항특성인 누적 소성 전단변형률을 1/2주기별로 산정하여 비교해 보면 그림 14와 같다.

그림 14에 나타난 누적 소성 전단변형률의 변화는 그림 13의 소산에너지 변화와 거의 유사한 것으로 나타났으며 특히, 액상화 발생시인 재하횟수 17.5회와 10.5회 이후의 큰 에너지 변화를 정확하게 표현하고 있음을 알 수 있었다. 이상의 결과로부터, 본 연구를 통해 제안된 액상화 저항특성인 누적 소성 전단변형률은 과잉간극수압의 발생에 기인하는 재료내부의 소산에너지 변화를 합리적으로 표현할 수 있으며 특히, 응력제어 진동삼축시험에서는 동일한 크기의 전단응력이 작용하므로 상대적으로 소산에너지 계산에 이용되는 높이 값이 일정하게 되므로 밀변의 역할을 하는 소성 전단변형률이

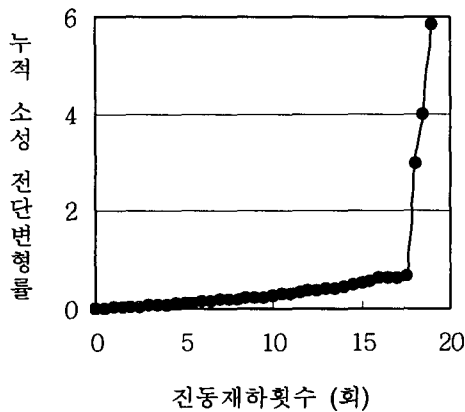


(a) 초기유효구속압 100kPa

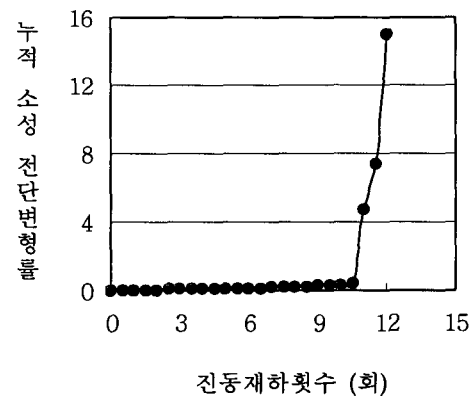


(b) 초기유효구속압 150kPa

그림 13. 재하횟수에 따른 누적 소산에너지 변화(상대밀도 40%)



(a) 초기유효구속압 100kPa



(b) 초기유효구속압 150kPa

그림 14. 재하횟수에 따른 누적 소성 전단변형률(상대밀도 40%)

소산에너지를 매우 효과적으로 표현할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 교란상태개념에 기초한 저항특성 산정법과의 비교

본 연구에서는 제안된 한계 저항특성의 타당성 검토를 위해 기제안된 교란도 함수의 최대곡률점을 통한 액상화 저항특성과 비교하였다. 이때, 제안된 산정법은 실내진동시험 결과를 1/4주기별로 나타내었으며 교란도 함수 이용시에는 1주기별 시험결과를 이용하였다. 그림 15는 교란도와 누적 소성전단변형률의 상관관계 및 이에 기초하여 획득된 교란도 함수를 나타내고 있으며 그림 16은 식 (4)~(6)을 이용하여 산정된 교란도 함수의 곡률반경을 나타낸 것이다. 그림 15와 그림 16에서 화살표로 나타낸 점은 교란도 함수곡선이 최대곡률인 경우에 해당되는 점으로 교란도 함수를 이용한 저항특성 산정에서는 이 점을 한계교란도로 정의하고 이 점에서 실제 액상화가 발생하는 것으로 간주한다. 그림 17은 본

연구를 통해 제안된 방법에 의해 산정된 1/4주기별 교란도와 누적 소성 전단변형률을 나타낸 것으로 그림에서 화살표 표시는 액상화 상태전환시점을 나타내고 있다.

그림 15와 같이 수치화된 교란도 함수의 최소곡률반경을 이용한 액상화 저항특성치와 그림 17과 같이 유효응력경로상에서 1/4주기별로 산정한 액상화 저항특성치를 비교해 보면, 다소 차이가 있음을 발견할 수 있는데, 이는 액상화 상태전환 후, 유효응력이 0으로 되어가는 과정에서 발생하는 대변형의 포함유무에 발생한 것으로 제안된 방법에서는 1/4주기별로 결과를 분석하여 실제 진동시험상에서 압축-제하 및 인장-재제하시에 발생하는 액상화 상태전환시점을 합리적으로 반영할 수 있는 반면, 교란도 함수를 이용하는 경우에는 수치함수의 이용으로 소정의 대변형이 포함되었기 때문이다. 각 방법을 통해 산정된 최종 액상화 저항특성치는 표 3에 나타난 바와 같다.

표 3을 보면, 전반적으로 상대밀도 및 유효구속압이 작을수록 액상화 한계저항특성치가 큰 것으로 나타났

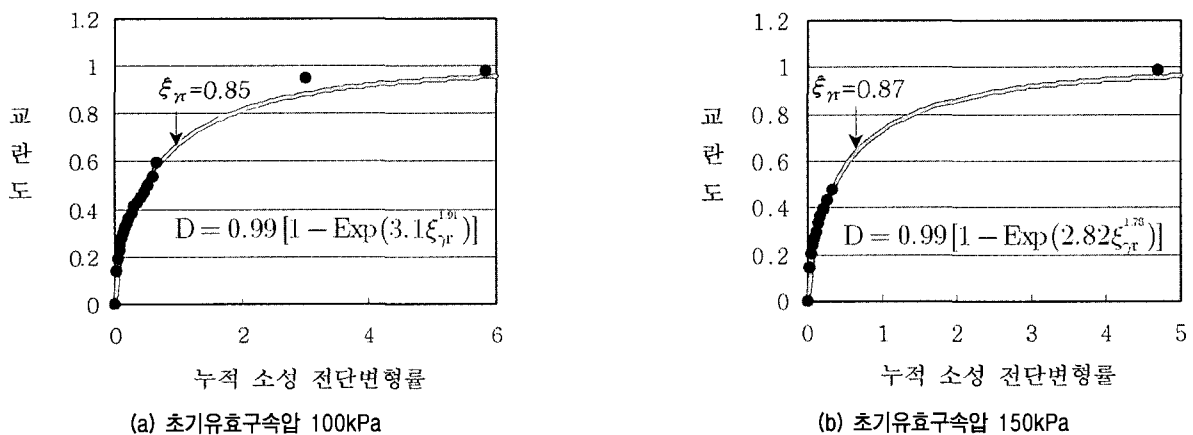


그림 15. 교란도-누적 소성변형률 상관관계 및 교란도 함수

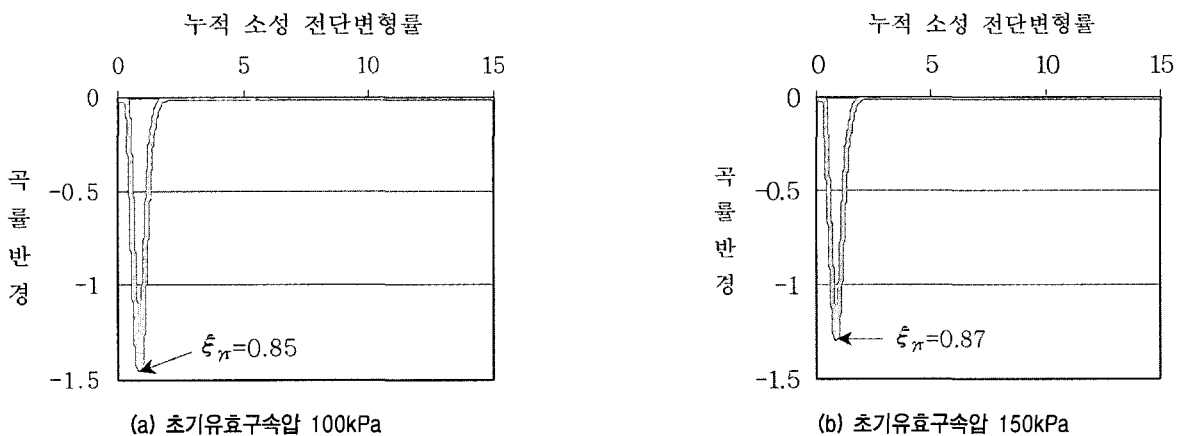
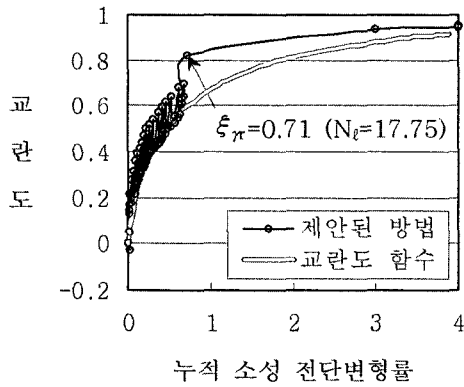
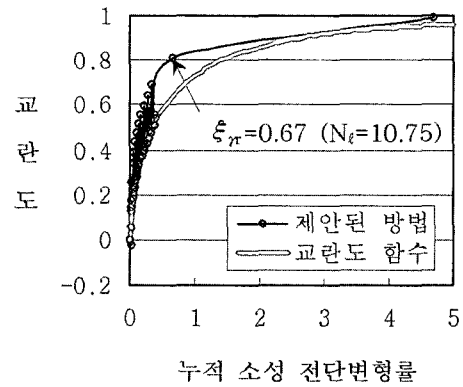


그림 16. 교란도 함수곡선에서의 곡률반경변화



(a) 초기유효구속압 100kPa



(b) 초기유효구속압 150kPa

그림 17. 제안된 방법에 기초한 교란도-누적 소성 전단변형률 상관관계

표 3. 결정된 액상화 한계저항상태까지의 누적 전단소성변형률 비교

초기유효구속압	상대밀도	40%		50%		60%	
		제안	기존	제안	기존	제안	기존
60 kPa		0.71	0.91	0.65	0.87	0.52	0.75
100 kPa		0.71	0.85	0.58	0.85	0.46	0.73
150 kPa		0.67	0.87	0.52	0.72	0.44	0.69

는데 이는 진동하중으로 인한 토체의 재배열과 이에 따른 간극수의 움직임이 상대적으로 여유있는 충분한 여유간극비(송병용 등, 2004)를 보유하게 되는 낮은 상대밀도 및 작은 유효구속압 상태의 시료조건이 반영된 것으로 판단된다. 또한, 전반적으로 제안된 방법으로 결정된 누적 소성 전단변형률이 0.71이하인 반면, 기존의 방법에 기초한 결과는 대부분이 0.71이상의 값을 나타내었다. 이는 교란도 함수곡선의 곡률반경을 이용하는 기존의 방법에서는 대변형이 포함된 자료를 이용하고 있기 때문에 액상화 한계저항특성치가 크게 산정된 반면, 제안된 방법에서는 대변형이 발생하기 전, 액상화 상태 변환까지의 변형률 자료만을 이용하기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로, 기존의 교란도 함수곡선을 통해 액상화 한계 저항특성치를 산정하게 되면, 지반의 저항특성이 높게 평가되어 실제 지진발생시 예상치 못한 지반 변형으로 인해 심각한 피해가 발생할 가능성이 크다. 이에 반해, 본 연구를 통해 제안된 누적 소성 전단변형률은 과잉간극수압의 발생에 기인하는 재료내부의 소산 에너지 변화를 합리적으로 표현하고 있을 뿐만 아니라, 응력경로 상에서 뚜렷하게 구분되는 액상화 전환시점에서 대변형을 포함하지 않고 정의되기 때문에 이를 한계 저항특성으로 사용할 경우, 이에 대한 신뢰성이 매우 높을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 일반적으로 이용이 빈번한 정현하중 재하의 실내진동시험으로부터 획득한 여러 시험결과에 대한 분석을 통해 지반의 동적상태를 점진적 응력감소, 급진적 응력감소, 그리고 액상화 후 거동의 3단계로 분류하였다. 그리고, 액상화 저항특성치 산정을 위해 점진적 응력감소에서 급진적 응력감소로 상태전환되는 시점을 액상화에 저항하는 지반의 한계상태로 정의하고 이 시점까지의 1/4주기별 소성 전단변형률을 누적하여 이를 액상화 저항특성치로 정하였다. 또한, 제안된 액상화 저항특성치의 타당성 검토를 위해 기존의 교란도 함수에 기초하여 산정된 지반의 액상화 저항특성치와 비교하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 등가전단응력개념의 이용으로 3회 이상의 진동시험 결과 중 최대축차응력과 액상화 발생 진동재하횟수만을 이용하는 기존의 상세평가법과는 달리, 제안된 평가법은 1회의 진동시험에서 획득가능한 응력-변형률 상관곡선, 과잉간극수압변화곡선, 유효응력 경로 등 다양한 시험결과를 충분히 활용하여 지반의 동적거동을 합리적으로 반영하고 있는 것으로

나타났다.

- (2) 유효응력이 완전상실되는 점을 액상화 발생으로 간주하는 기존의 이론과는 달리, 제안된 평가법에서는 동적 유효응력경로로부터 확연히 드러나는 액상화 전환시점을 결정하고 이 점까지의 누적 소성 전단변형률을 응력-변형률 상관곡선을 통해 계산하여 액상화 저항특성치 지표로 사용하였다. 제안된 액상화 전환시점은 진동하중하에서 발생하는 미소변형만 포함하고 대변형의 영향은 받지 않기 때문에 지반의 한계상태를 합리적으로 반영할 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) 제안된 한계 누적 소성 전단변형률에 대한 타당성 검토결과, 제안된 방법을 통해 1/4주기별로 산정된 값들이 응력제어 진동삼축시험시 과잉간극수압에 의해 소산되는 재료내부의 에너지 변화를 합리적으로 표현할 수 있을 뿐만 아니라 기존의 교란도 함수에 기초하여 산정된 값보다 한계상태를 실험결과로부터 직접적으로 정의하고 있는 것으로 나타났다. 이는 기존의 방법에서는 수치함수화를 위해 1주기별 시험결과와의 이용으로 대변형의 영향이 포함되어 있는 반면, 제안된 평가법에서는 1/4주기별 시험결과와의 이용으로 대변형의 영향이 없는 상태전환시점을 충분히 반영할 수 있음에 기인한 것이다. 그러므로, 본 연구를 통해 제안된 지반의 액상화 저항특성치는 진동하중을 받는 지반의 한계상태를 합리적으로 반영하고 있으므로 실제 액상화 평가에서도 해석결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 교육부를 통한 두뇌한국21 지원에 의한 것입니다.

### 참고 문헌

1. 김경환, 박인준, 김수일 (1998), 재료의 역학적 거동특성에 기초한 액상화 평가방법, *한국지반공학학회 논문집*, 한국지반공학학회, 14권, 11호, pp.205-218.
2. 김수일, 최재순, 강한수 (2004), 진동시험에 기초한 액상화 상세 예측법 개발, *한국지반공학학회 2004 봄학술대회*, 한국지반공학학회.
3. 송병용, 김홍택, 安原一哉, 村土哲, 박인준 (2004), 흙의 종류에 따른 강도와 강성저하 특성, *한국지반공학학회 2004 봄학술대회*, 한국지반공학학회.
4. 심재욱, 박근보, 최재순, 김수일 (2002), 실지진하중을 이용한 포화사질토의 액상화 저항강도에 관한 실험적 연구, *한국지반공학학회 논문집*, 한국지반공학학회, 18권, 4호, pp.329-337.
5. 최재순 (2002), *교란상태개념에 기초한 포화사질토의 비배수 동적거동 예측기법 개발*, 박사학위논문, 연세대학교.
6. 최재순, 김수일 (2003), 포화사질토의 동적거동규명을 위한 수정 교란상태개념, *한국지진공학학회 추계학술발표회 논문집*, 제7권, 2호, pp.107-106.
7. 최재순, 홍우석, 박인준, 김수일 (2002), 지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (I): 이론제안, *한국지반공학학회 논문집*, 제18권, 1호, pp.91-99.
8. 한국지진공학학회, *항만 및 어항시설의 내진설계 표준서*, 해양수산부, 1999.
9. Desai, C. S. (1992), "The Disturbed State as a Phase Transformation Through Self-Adjustment Concept for Modelling of Mechanical Response of Materials and Interfaces", *Report to the National Science Foundation*, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tuscon, Arizona.
10. 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.
11. Desai, C. S. (2001), *Mechanics of Materials and Interfaces ; The Disturbed State Concept*, CRC Press.
12. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kaneko, T. (1992), "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility", *Soil and Foundation*, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.1-15.
13. Okada, N. and Nemat-Nasser, S. (1994), "Energy Dissipation in Inelastic Flow of Saturated Cohesionless Granular Media", *Geotechnique*, Vol.44. No.1, pp.1-19.
14. Park, I. J. (1997), *Disturbed State Modelling for Dynamic and Liquefaction Analysis*, Ph.D. Dissertation, Univ. of Arizona, Tuscon, Arizona.
15. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.97, No.SM9, pp.1249-1274.
16. Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, I. (1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.109, No.3, pp.458-482.

(접수일자 2004. 7. 21, 심사완료일 2004. 9. 20)