

# 다양한 진동하중의 액상화 시험을 통한 동적 과잉간극수압에 대한 상세분석

## Detailed Investigation on the Dynamic Excess Pore Water Pressure through Liquefaction Tests using Various Dynamic Loadings

최재순<sup>1)</sup> · 장서용<sup>2)</sup> · 김수일<sup>3)</sup>

Choi, Jae-Soon · Jang, Seo-Yong · Kim, Soo-Il

**국문 요약 >>** 지진시 발생하는 지반 액상화 현상은 지진피해예측시 가장 중요하게 평가해야 하는 항목으로 실내에서 액상화 현상을 시뮬레이션하는 경우, 불규칙성의 지진을 기계적으로 제어하기 어려운 이유로 등가반복형태의 정현파 또는 썩기파를 이용하는 것이 통상적이었다. 그러나, 90년대 이후 컴퓨터의 발달과 함께 한 신호처리 및 제어기술의 급속한 발전은 동역학분야에서의 실험연구에 큰 도움을 주었으며 지반진동분야의 경우, 진동대 및 원심모형기와 같은 대형지진모의시험에서 실지진하중을 이용한 연구사례들이 증가되고 있는 실정이다. 국내에서도 실지진하중재하가 가능한 요소시험결과에 대한 연구사례가 발표되는 등 이에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 특히, 실지진하중 시험결과로부터 실지진하중하에서의 과잉간극수압의 변화가 정현하중시험에서의 결과와 큰 차이를 보이고 있다는 분석결과가 발표되어 현재까지 지반동역학분야에서 지진하중의 불규칙성을 크게 고려하지 않았던 통상적 가정사항들이 문제점으로 대두되어 관심을 집중시키고 있다. 본 연구에서는 등가의 정현파 및 썩기파와 증가형태의 썩기파, 그리고 실지진파 등 다양한 진동하중을 재하할 수 있는 삼축압축시험기를 이용하여 기존의 유효응력개념에서 사용하는 과잉간극수압관련 매개변수인 소성일, 전단소성 변형률, 상각계도, 그리고 액상화 상태전환선의 기울기를 비교분석하였으며 하중변화에 따른 토립자의 변형과 간극수압의 변화를 상세분석하였다. 연구결과, 토립자의 변형, 간극수의 동적흐름, 동적흐름 속도수두의 압력수두로의 전환, 그리고 과잉간극수압의 증가로 표현되는 새로운 개념의 액상화 발생이론을 제안하였으며 그 타당성 검토를 위해 과잉간극수압과 동적흐름의 압력수두(흐름속도의 제곱값)와의 상관관계를 비교하였다.

**주요어** 동적흐름, 과잉간극수압, 속도수두, 압력수두, 실지진하중

**ABSTRACT >>** In most experimental researches on the liquefaction phenomenon, an earthquake as a random vibration has been regraded as a sinusoidal wave or a triangular wave with an equivalent amplitude. Together with the development in the part of signal control and data acquisition, dynamic experimental equipments in the soil dynamics have also developed rapidly and further more, several real earthquakes have been simulated in the large model test such as shaking table tests and centrifuge tests. In Korea, several elementary laboratory tests to simulate the real earthquake load were performed. From these test results, it was reported that the sinusoidal wave cannot reliably reflect the soil dynamic behavior under the real earthquake motion. In this study, 4 types of dynamic motions such as the sinusoidal wave, the triangular wave, the incremental triangular wave and several real earthquake motions which were classified with shock-type and vibration-type were loaded to find something new to explain the change of the excess pore water pressure under the real earthquake load. Through the detailed investigation and comparison on all test results, it is found that the dynamic flow is generated by the soil plastic deformation and the velocity head of dynamic flow is changed the pressure head in the un-drained condition. It can be concluded that the change of the excess pore water pressure is related to the pressure head of dynamic flow. Lastly, a new hypothesis to explain such a liquefaction initiation phenomenon under the real earthquake load is also proposed and verified.

**Key words** dynamic flow, excess pore water pressure, velocity head, pressure head, real earthquake motion

<sup>1)</sup> 정회원·서경대학교 토목공학과 전임강사  
(대표지자: geotech@skuniv.ac.kr)

<sup>2)</sup> 전남대학교 토목공학과 대학강사

<sup>3)</sup> 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 1. 8 / 심사종료일 : 2007. 2. 9)

### 1. 서론

지진공학에서 지반분야연구는 구조물에 앞서 지진하중을 받는 지반 내 지진증폭과 액상화 연구에 중점연구되고 있으

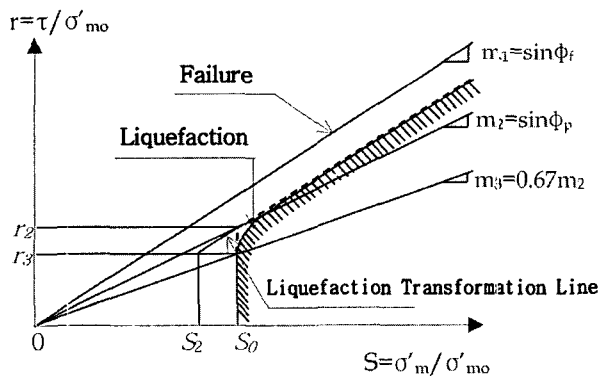
며 이와 관련된 연구결과는 지반-구조물 내진설계 및 재해도 작성 등에 이용되고 있다. 지진시 액상화 발생의 경우, 지상위의 시설물 및 사회구성원보다 앞서서 지진의 영향을 받으므로 구조물 내진설계시 최우선적으로 그 발생여부가 평가되어야 한다고 규정하고 있다.<sup>(1)</sup> 액상화 현상은 지진하중과 같은 급작한 진동하중 작용시 지반내 간극수압이 발전하여 오력에 대항하는 토립자의 접촉력을 상실시킴으로써 지반이 마치 액체와 같은 거동을 하게 되는 것으로 그 주원인은 급작한 진동하중으로 발생하는 비배수 과잉간극수압에 있다. 이러한 동하중하의 비배수 과잉간극수압에 대한 예측을 위해서 90년대 이후, 소성일<sup>(2),(3)</sup>, 소산에너지<sup>(4)</sup>, 그리고 소성전단변형을 상각궤도<sup>(5-9)</sup> 등 토립자의 동적 물리량과 간극수의 비배수 동적 과잉간극수압 간의 상관관계에 기초한 유효응력해석모델들이 제안되어 왔으며 이를 이용한 수치해석 프로그램<sup>(10),(11)</sup>이 개발되어 실제 내진설계에 이용되고 있다. 그러나, 해석모델의 기본 변수들이 지진하중 재하시험이 아닌 정현하중시험결과로부터 결정되기 때문에 지진시 지반의 거동을 정확하게 표현하고 있다고 보기는 어렵다고 알려져 왔다. 특히, 최근의 국내 연구<sup>(12),(13)</sup>로부터 정현하중 재하시와 실지진하중 재하시 액상화를 발생시키는 소성일의 크기가 큰 차이를 보이고 있음이 밝혀진 바 있다. 또한, 실지진하중 재하시 하중이 제하 및 재제하 등의 하중 제거상태임에도 불구하고 일정수준이상으로 증가된 과잉간극수압의 내부일로 인해 토립자의 변형과 과잉간극수압이 동반상승하면서 액상화로 전환되어지는 실험적 발견<sup>(14)</sup>이 발표되면서 기존의 유효응력 해석모델에서 이용하는 토립자의 누적소성변형과 과잉간극수압을 단순하게 상관짓는 기존의 유효응력 해석모델의 한계성이 나타남에 따라 이를 대체할 수 있는 새로운 접근방법의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 실제 포화 사질토지반의 지진시 거동예측의 정확도를 높이기 위해서 액상화의 주원인이 되는 간극수의 변화에 연구중점을 두고 등가의 정현하중 및 췌기하중, 증가형 췌기하중 그리고 실지진하중 시험을 수행하고 이에 대한 결과를 상세분석하였으며 실제 지진시 액상화 발생현상을 효과적으로 고려할 수 있는 새로운 액상화 발생이론을 제안하고 이와 관계된 토립자와 간극수의 동적특성치에 대한 타당성 여부를 검토하였다.

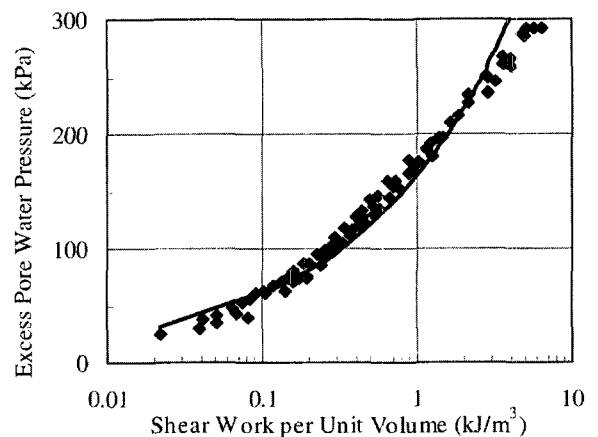
## 2. 기존의 동적 유효응력해석모델

액상화 발생의 원인이 되는 과잉간극수압의 변화에 초점을 둔 해석이론으로 1975년 배수조건의 체적변형률의 물리량만큼 비배수조건의 과잉간극수압이 발생한다는 가정아래 실험적 경험식을 제안한 Martin 등의 연구발표<sup>(15)</sup>를 들 수 있으며 캐나다의 브리티시 콜롬비아대학을 중심으로 최근까지 계속된 연구<sup>(16),(17)</sup>에서는 한국인 연구자가 큰 역할을 한 것으로 알려져 있다. 한편, 90년대 전후로 다양한 관점에서 유효응력개념의 해석법이 연구발표되었는데, 대표적으로 소성일개념<sup>(2),(3)</sup>(shear work theory), 소산에너지개념<sup>(4)</sup>(dissipated energy concept), 그리고 교란상태개념<sup>(5-9)</sup>(disturbed state concept)을 들 수 있다. 여기서, 소성일개념과 소산에너지개념은 용어상의 차이가 있을 뿐 실내시험결과로부터 획득된 응력-변형률 이력곡선 내부면적이 과잉간극수압의 발생과 상관관계에 있다는 기본가정은 동일하다.

Iai 등은 소성일개념에 기초하여 액상화 저항특성을 제안하였는데 일반적으로 나타나는 지반의 응력경로에 대한 분석을 통해 그림 1 (a)와 같이 팽창거동에서 압축거동으로 변하는 상태변환선(phase transformation line)을 이용하여 진



(a) 유효응력경로에 따른 상태구분<sup>(2)</sup>



(b) 소성일-간극수압<sup>(18)</sup>

〈그림 1〉 소성일개념에 기초한 액상화 저항특성

동하중하의 토체거동을 액상화 전(liquefaction front)상태와 액상화 상태로 구분하고 그림 1 (b)와 같이 실내시험을 통해 규명된 진동하중 하의 과잉간극수압과 소성일과의 상관관계<sup>(18)</sup>에 기초하여 각각의 상태를 규명하도록 하였다. 또한, 이들은 실제 수치해석에서의 이용을 위해 유한요소해석프로그램 FLIP<sup>(10),(11)</sup>을 개발하였으며 실제 개발된 프로그램은 일본의 공항 및 항만연구소(port and airport research institute)와 교토대학 방재연구소(disaster prevention research institute) 등을 중심으로 FLIP연구회가 구성되어 이에 대한 보완연구가 계속되어지고 있다.

소성일개념에 기초한 해석법에서는 액상화 전상태가 소성일비가 0.4보다 큰 경우로 정의하고 있는데 이를 과잉간극수압비로 표현하게 되면, 대략 초기유효구속압의 60% 수준의 과잉간극수압으로 간주가능하다. 대부분의 정현하중시험에서는 이 수준에서 초기 액상화로의 상태전환이 발견되는 것이 일반적이며 이때부터 토립자는 미소변형이 아닌 대변형거동을 하게 된다.

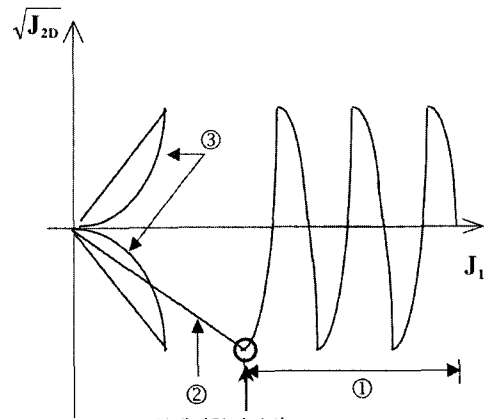
교란상태개념은 일종의 데미지(damage)이론으로 진동하중하의 포화사질토의 거동을 동역학적인 소성연화거동에 의한 교란으로 정의한 이론이다. 이 이론에서는 재료가 상대적으로 손상되지 않은(relative intact; RI) 상태와 완전파괴(fully adjusted ; FA)된 상태의 2가지 기준상태 내에서 실제 진동하중을 받는 재료가 외부하중으로부터 발생되는 재료내부의 미세구조 자체조정에 의해 초기 외부의 영향을 받지 않은 상태(RI)로부터 파괴상태(FA)로 점진적으로 진행한다고 정의하고 있다. 교란상태개념을 개발한 Desai는 이러한 동적 하중하의 재료거동변화를 누적된 소성 전단변형률과 연관시켜 교란도 함수(disturbance function)로 표현하였고 Park은 실삼축시험을 통한 타당성 검토와 DSC-Dyn2D라는 유한요소해석프로그램을 개발하였으며 이를 기초로 하여 포화사질토와 모형말뚝의 동해석과 같은 지반-구조물 상호작용연구까지 그 적용범위를 확장시킨 바 있다. 국내에서는 김수일과 최재순<sup>(19),(20)</sup>이 정현하중 재하에 의한 액상화로의 상태전환(phase transformation)이 소성일개념에서 제안된 바와 같이 유효응력이 0이 아닌 시점에서 시작됨을 재확인하고 이를 고려해야 함을 주장하였을 뿐만 아니라, 이러한 발견을 토대로 정현하중을 받는 포화사질토의 동적거동을 그림 2와 같이 액상화 상태전환전, 초기 액상화 발생, 그리고 액상화후 거동의 3부분으로 분류하고 각각의 상태를 교란도 함수, 상태변화선(phase change line), 그리고 항복상태선을 통해 거동을 예측하도록 기존의 DSC해석법을 보완한 바 있다. 또한, 보완된 수정 DSC해석법에서는 액상화 상태변화시점에서 대변형이 시작됨을 밝히고 이 시점까지의 누적소성변형이 한계

액상화 저항치로 이용가능함을 증명한 바 있다.

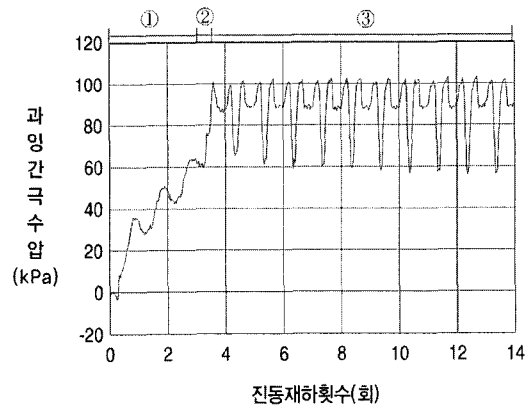
교란상태개념에서의 응력상태에 대한 교란도는 다음의 식으로 정의되며 응력-변형률 관계는 그림 3에 나타낸 바와 같다.

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

여기서, 윗 첨자 i, c, 그리고 a 는 각각 RI상태, FA상태, 그리고 시료의 실제거동상태를 표시하며,  $\sigma'$  는 평균유효응

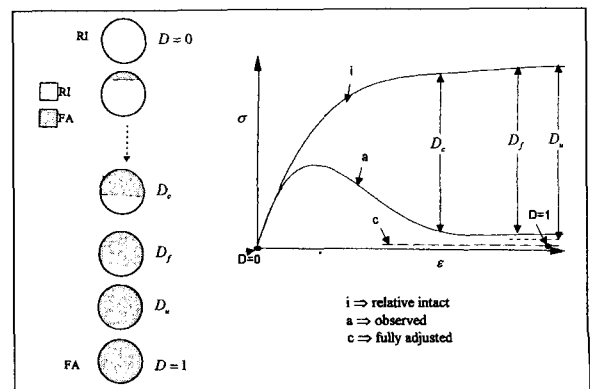


(a) 유효응력경로



(b) 과잉간극수압

〈그림 2〉 진동하중을 받는 등방구속하의 포화사질토의 거동<sup>(20)</sup>



〈그림 3〉 응력-변형률 관계도상의 교란도<sup>(9)</sup>

력이고  $\tau$ 는 평균전단응력이다.

교란상태개념에서는 과잉간극수압의 증가에 따른 교란도의 변화가 소성변형의 누적량과 관계가 있음에 기초하는데 이를 교란도 함수라 정의하고 있으며 일반적인 상관관계는 그림 4에 나타낸 바와 같다.

그림 4에서  $\xi_D$ 는 소성변형의 누적량을 나타내는 매개변수인 전단 소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strain trajectory)이며 산정식은 식 (2)와 같다. 식 (2)에서,  $dE_{ij}^p$ 는 전단 소성변형률 증분이고  $de_{ij}^p$ 와  $de_v^p$ 는 소성변형률 증분과 체적 소성변형률 증분이다. 비배수 동하중재하조건에서는 체적 소성변형이 발생하지 않으므로 전단 소성변형만을 고려하면 된다.

$$\xi_D = \int d\xi_D = \int \sqrt{dE_{ij}^p dE_{ij}^p} \quad (\text{여기서, } dE_{ij}^p = de_{ij}^p - \frac{1}{3}de_v^p) \quad (2)$$

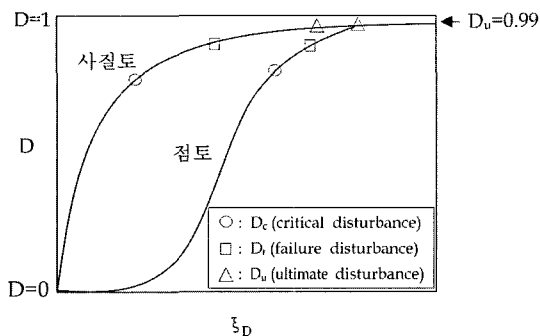
앞서 언급한 바와 같이, 교란상태개념에서는 포화사질토의 동적거동을 소성변형의 누적량과 식 (1)에 의해 정의된 교란도와와의 상관관계를 통해 나타내게 되며 이를 교란도 함수라고 하며 그 상관식은 식 (3)에 나타낸 바와 같다.

$$D = D_u(1 - e^{-A\xi_D^Z}) \quad (3)$$

여기서,  $D_u(=0.99)$ 는 재료의 매개변수이고이며 A, Z는 1사이클 또는 1/2사이클별로 결정된 교란도와 전단 소성변형률의 상관관계를 수식화하는데 이용되는 매개변수이다.

### 3. 실내진동시험 결과 분석

현재까지 포화사질토의 액상화 해석이론들은 비배수조건 하에서의 누적소성변형과 과잉간극수압의 상관관계에 기초하고 있으며 정현하중을 이용한 실내시험을 통해 그 타당성을 검토한 것이 특징이다. 그러나, 최근 국내에서 수행된 실지진하중 재하시험으로부터 불규칙한 동하중시험결과가 정현하중시험에 기초한 기존의 상관관계와 큰 차이를 보이고 있음이 밝혀지면서 이를 보완할 대책마련의 필요성이 대두



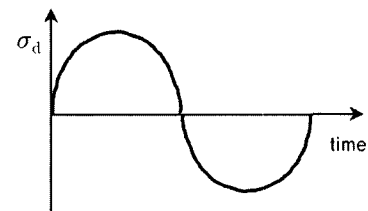
〈그림 4〉 교란도 함수의 도식적인 형태<sup>(19)</sup>

된 바 있다.

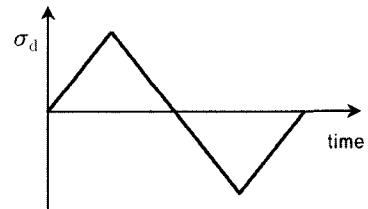
본 연구에서는 동일 시험시료에 대해 다양한 하중형태의 실내진동시험을 수행하고 기존의 유효응력해석법에서 근간이 되는 주매개변수와 과잉간극수압간의 상관관계에 있어서 하중형태가 미치는 영향을 우선적으로 검토하였다. 다른 한편으로는 실제 지진시 액상화 발생을 효과적으로 나타낼 수 있는 새로운 이론을 제안하고자 하중변화에 따른 변형률과 과잉간극수압의 변화를 상세분석하였으며 이를 토대로 액상화 발생을 유발시키는 과잉간극수압 매개변수를 제안하고 이에 대한 타당성 검토를 수행하였다.

### 3.1 실내진동시험

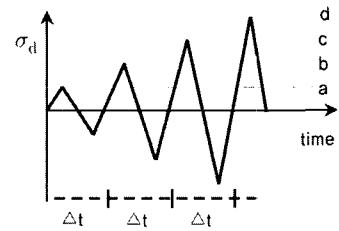
다양한 하중형태에 따른 포화사질토의 동적거동특성 비교를 위해 주진진 표준사를 대상으로 진동삼축시험을 수행하였다. 시험에 이용된 하중형태는 그림 5에 나타낸 바와 같



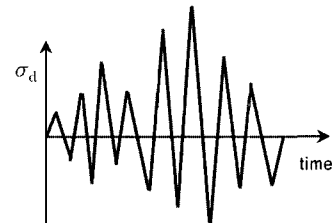
(a) 등가반복 정현파



(b) 등가반복 췌기파



(c) 선형증가 췌기파



(d) 실지진파

〈그림 5〉 진동삼축시험시 하중형태

이 등가반복의 정현파 및 썰기파, 선형증가 썰기파, 그리고 실지진파이다. 선형증가 썰기파시험에서는 그림 (c)의 a, b, c, d의 크기를 선형증가율( $b-a/c-b=c-b/d-c$ ) 1.2와 1.8로 정하고 실험을 수행하였다.

시험시료인 주문진 표준사의 기본 물성 및 진동삼축시험시 제반조건은 표 1과 같으며 이때, 기본 물성시험은 ASTM을 참고하여 수행하였다. 본 진동삼축시험기는 ELE Co.에서 제작된 시험기로 재현주파수가 1-70 Hz로 통상 0.1-10 Hz의 범위를 갖는 지진 주파수에서 지진이 크게 나타나는 고 파수대역의 시험이 가능하다. 또한, 본 시험기는 정현하중재하의 경우, 재하시간의 제약을 받지 않지만, 선형증가 썰기파, 실지진파와 같은 불규칙하중의 재하에서는 지속시간 최대 24초까지 재현가능하다. 구속조건은 등방압밀상태에서 시험을 수행하게 되지만, 별도의 장치를 추가적으로 설치하게 되면 비등방압밀하에서의 시험 또한 가능하다. 본 시험에서는 대표적으로 지진을 잘 표현한다고 알려져 있는 1 Hz의 진동주파수<sup>(21)</sup>를 선택하였으며 등방압밀조건하에서 정현파와 등가의 썰기파, 그리고 선형증가형 썰기파 시험에서 재현하였다.

실지진파 시험에서는 실제 계측된 실지진기록을 모사하여 하중을 재하하였으며 이용된 지진기록들에 대한 설명과 시간이력곡선을 표 2와 그림 6에 나타낸 바와 같다. 표 2에서 유효지속시간은 실제 가속도 시간이력에서 RMS(Root Mean Square) 5~95% 수준의 가속도 기록만을 고려한 지속시간으로 Trifunac과 Brady<sup>(22)</sup>의 연구발표에 기초한 것이

다. 또한, 표 2의 지진기록에서 충격형과 진동형의 구분은 Ishihara와 Perlea<sup>(23)</sup>가 제안한 연구발표논문에서 기초하였으며 이때, 충격형 지진파는 최대하중이전 가속도기록 중 최대하중의 60%이상의 기록이 3회 미만일 경우에 해당되며 3회 이상일 경우에는 진동형으로 구분하게 된다. 그림 6은 실제 최초로 가속도 지진계측기로부터 획득되는 가속도 시간 이력곡선으로 데이터 개수와 무차원의 축하중이 횡축과 종축을 각각 나타내고 있다. 실지진하중 재하시험에서는 어떤 크기의 하중이력에 의해 액상화가 발생할지 알 수 없기 때문에 액상화가 발생하지 않은 경우에는 전체 하중이력곡선을 동일하게 증가시켜 동일한 시험과정을 반복하였으며 이때, 표 2의 유효지속시간은 동일하게 유지하였다.

### 3.2 시험결과

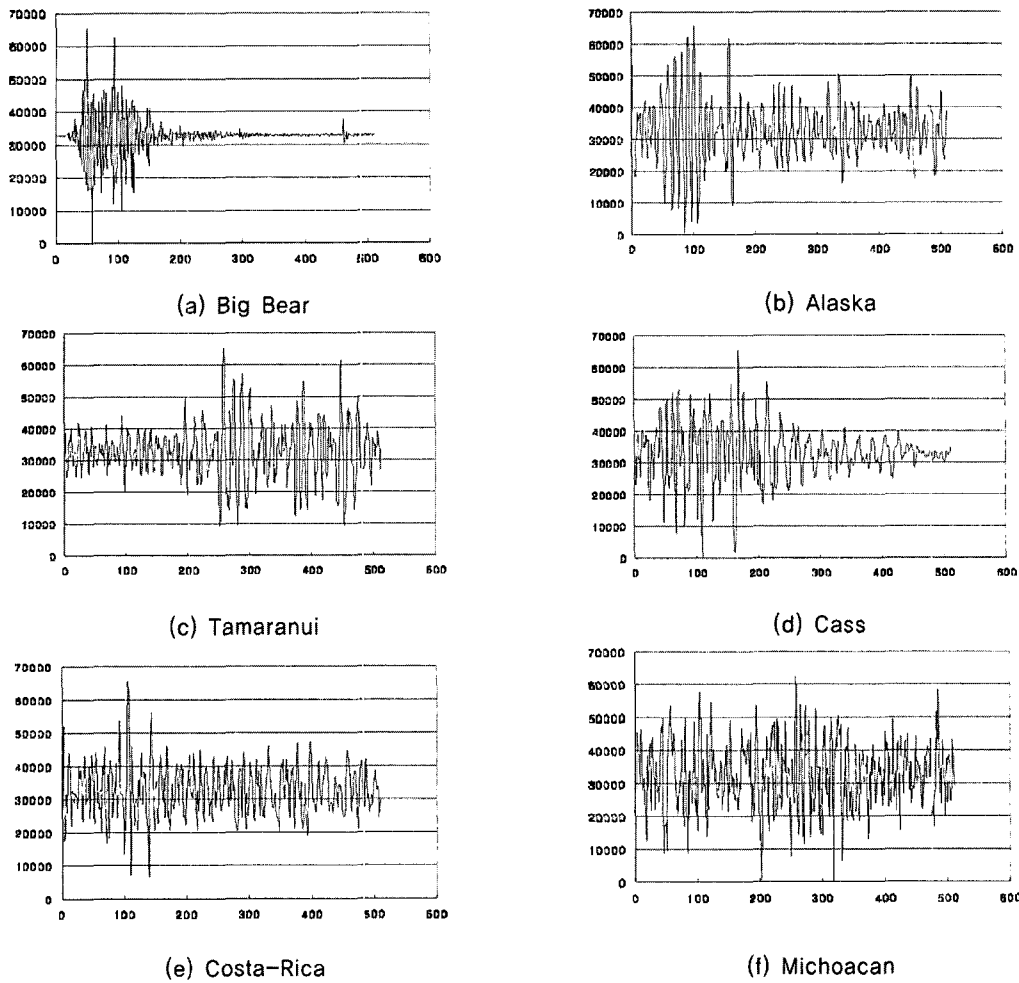
그림 4와 같이 등가의 정현파 및 썰기파, 증가형 썰기파, 그리고 지진파로 구분되어 실시한 하중형태에 따른 시험결과, 정현파 시험과 썰기파 시험으로부터 지반의 저항강도특성과 관련된 물리량인 과잉간극수압 및 유효응력경로의 변화가 거의 유사한 형태를 보인 반면, 불규칙한 동하중인 증가형 썰기파와 지진파 시험결과와는 다른 경향을 나타내었다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 등가의 썰기파, 증가형 썰기파, 충격형 지진파, 그리고 진동형 지진파 4가지로 구분하여 상세분석하였다. 등가의 썰기파 및 증가형 썰기파의 시험결과로부터 시간에 따른 간극수압의 변화를 나타내면 그림 7과 같으며 원으로 표시된 부분은 유효응력이 0이

〈표 1〉 실내진동시험시 제반조건(주문진 표준사)

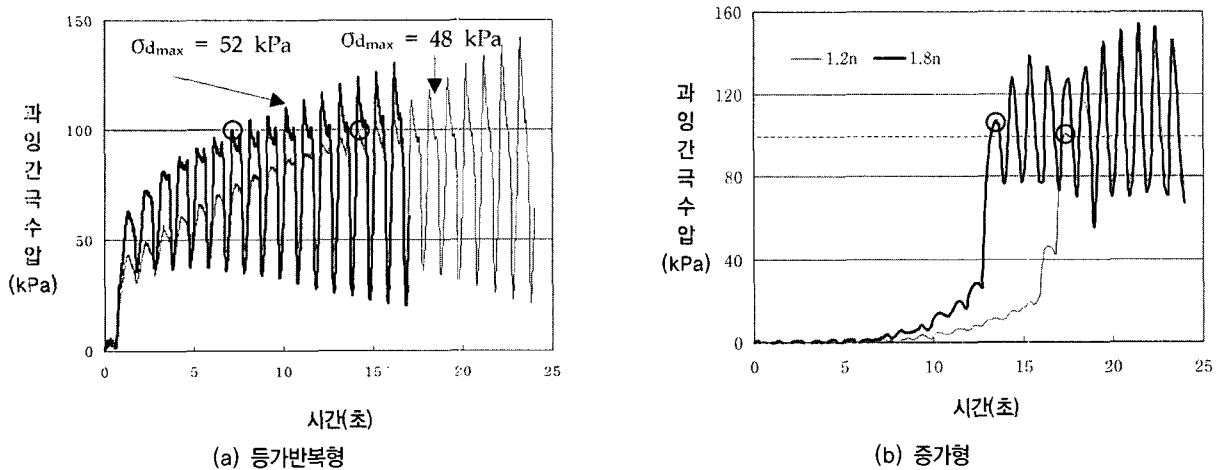
입도분포	물성	종류	시험 조건
최대입경	0.84 mm	상대밀도	60%
최소입경	0.07 mm	초기유효구속압	100 kPa
평균입경	0.49 mm	하중종류	등가반복 정현/썰기파, 선형증가 썰기파, 실지진파
균등계수	1.35	제어방식	응력제어방식
곡률계수	1.14	진동수 (등가, 증가형)	1.0 Hz
통과중량백분율 10% 입경	0.37 mm	선형증가율 (증가형)	1.5, 2, 2.5
통과중량백분율 60% 입경	0.50 mm	실지진파의 지속시간	RMS의 5~95% 유효지속시간
최소건조단위중량	1.39 t/m <sup>3</sup>	시료조건	포화, 비배수
최대건조단위중량	1.60 t/m <sup>3</sup>	시료성형방법	수중침강법

〈표 2〉 진동삼축시험에 이용된 지진기록

충격형 지진파	지진규모	유효지속시간	진동형 지진파	지진규모	유효지속시간
Big Bear	6.5 Mw	24 초	Alaska	6.6 Mw	13 초
Taumaranui	6.6 Mw	20 초	Cass	6.2 Mw	11 초
Costa-Rica	7.5 Mw	21 초	Michocan	8.1 Mw	23 초



〈그림 6〉 지진하중시험에 이용된 지진가속도 시간이력

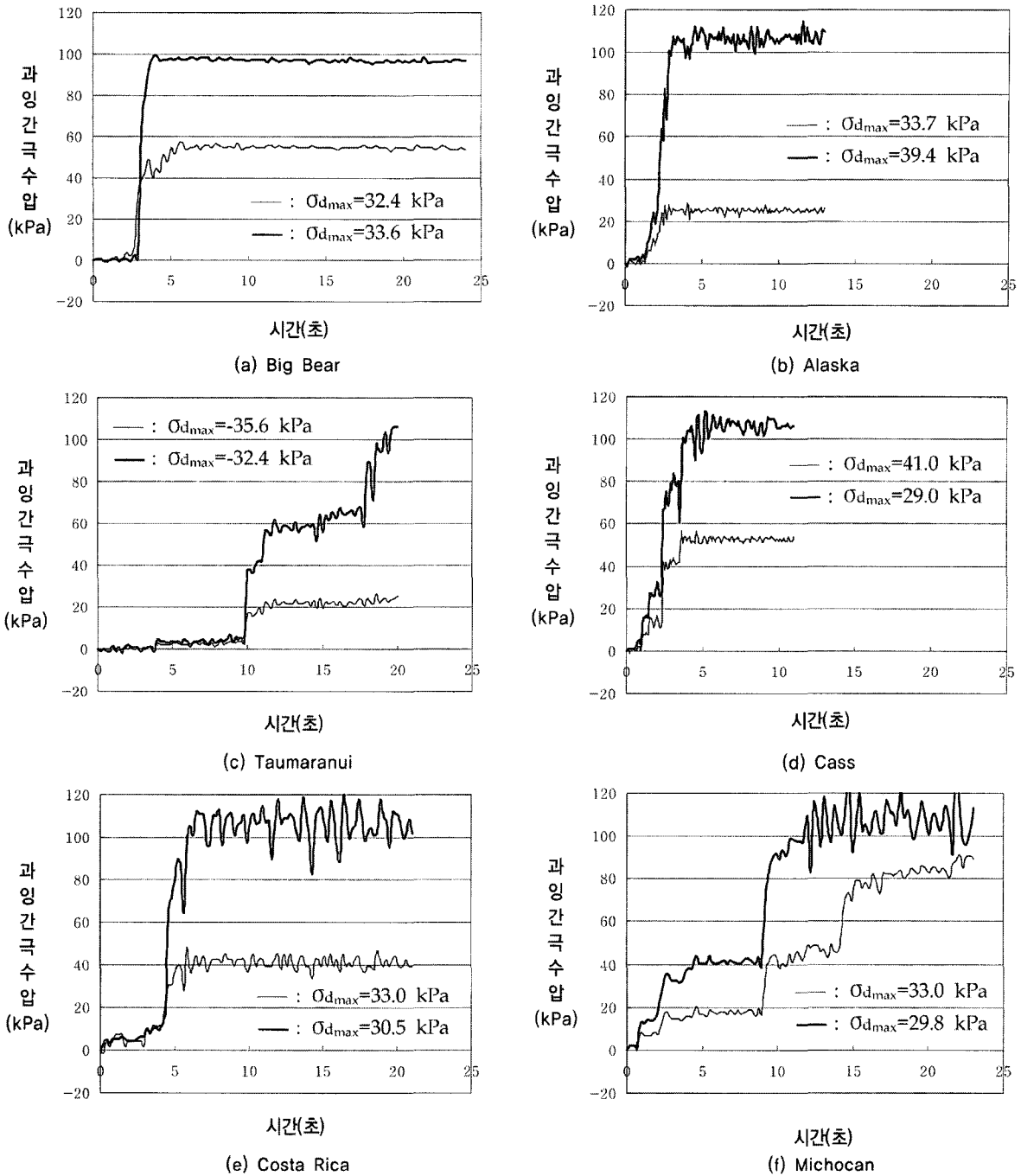


〈그림 7〉 빼기형태 진동시험의 과잉간극수압 변화

되는 초기 액상화가 발생한 지점을 나타내고 있다. 또한, 그림 5의 입력하중형태에 대한 지진파 시험시 입력지진하중과 시간에 따른 간극수압의 변화는 그림 8과 같으며 이때, 액상화가 발생하지 않은 시험결과도 함께 나타내었다.

그림 7의 (a)를 보면, 등가의 빼기파에 의한 과잉간극수압의 변화는 첫 번째 동하중 작용시 큰 간극수압의 증가를 보

인후, 이후로는 점진적으로 간극수압이 증가하면서 액상화로 상태전환되는 경향을 보였다. 이에 반해, 증가형 빼기파와 지진파에 의한 간극수압의 변화거동을 보면, Michoacan 지진파와 Tamaruani 지진파 시험을 제외하고는 최대하중 작용시 또는 작용지후, 간극수압이 급증하여 액상화로 발전하거나 초기 액상화가 발생하는 것으로 나타났다. Michoacan



〈그림 8〉 시간에 따른 과잉간극수압 변화 (지진파)

지진파와 Tamarunui 지진파 시험에서는 액상화 발생시 간극수압의 눈에 띄는 증가가 2번에 걸친 점을 찾아 볼 수 있는데 이는 그림 5의 가속도 시간이력곡선에서도 쉽게 발견할 수 있듯이 최대하중 재하후 시간이력에서도 눈에 띄는 큰 하중의 재하가 후속되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 그림 8에서 액상화 발생하지 않은 결과들을 보면, 전반적으로 최대간극수압이 60 kPa 미만인 것으로 나타남에 따라 액상화로 상태변화 시작점을 간극수압비 0.6로 간주하는 기존의 연구결과들이 타당성이 있음을 재확인하였다. 이상의 시험결과로부터 등가반복형태의 동하중은 지진에 의한 액

상화 발생현상을 효과적으로 표현치 못하는 것으로 나타났다. 또한, 하중이력상의 크기와 관련하여 전반적으로 최대하중 작용시 급작한 과잉간극수압의 증가 또는 액상화로 상태전환이 발생하는 것으로 나타나 불규칙한 진동하중에 있어서 최대하중이 액상화 발생에 큰 영향을 미치는 요소임을 재확인하였다. 그러나, 증가형 썰기파 시험의 액상화 발생시 최대하중이 20 kPa 내외로 액상화 발생시 최대하중이 30~40 kPa인 지진파 시험보다 작은 수준인 점으로부터 최대하중 이전의 하중들도 그 크기에 관계없이 액상화 발생에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 이는 간극수가 독립

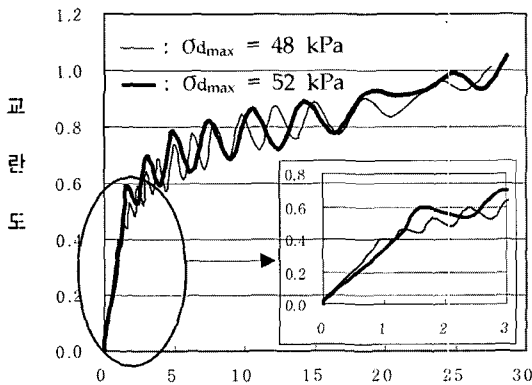
자와는 달리 액체가 갖게 되는 에너지 포텐셜을 보유하여 하중의 크기보다는 동하중 재하횟수에 더 밀접한 관계가 있음에 기인한 것으로 판단된다.

**3.3 기존 유효응력개념의 과잉간극수압 관련 파라미터에 대한 분석**

본 연구에서는 기존의 유효응력개념의 구성모델에서 이용하는 토질정수와 과잉간극수압간의 상관관계를 상세분석하기 위해 시험결과로부터 획득한 응력-변형을 상관도를 이용하여 전단 소성변형을 상각계도와 소성일을 산정하였다. 전단 소성변형을 상각계도는 응력-변형을 상관도에서 1/2사이클별로 변형률이 0이 되는 곳을 기준으로 식 (3)을 이용하여 산정하였으며 소성 전단일 계산시에는 상관관계의 곡선내부면적을 삼각형 면적법으로 계산하여도 전체적인 변화거동분석에는 무리가 없다는 연구결과<sup>(20)</sup>에 기초하여 1/2사이클별로 소성일을 누적계산하였다. 그림 9와 10은 초기 액상화 발생전까지의 시험결과(등가 썰기파, 증가형 썰기파,

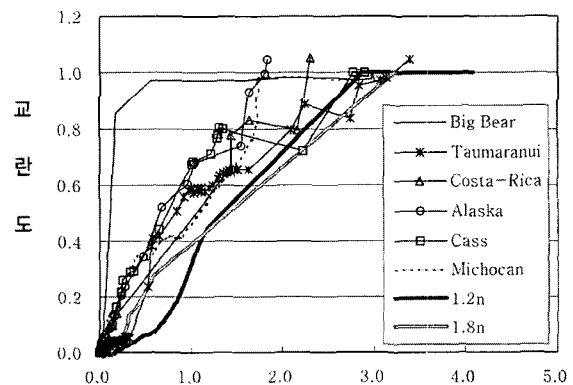
충격형 지진파, 진동형 지진파)들로부터 산정한 전단 소성 변형을 상각계도와 교란도, 그리고 소성전단일(plastic shear work)과 과잉간극수압비의 상관관계를 나타내고 있다.

그림 9와 10의 결과를 보면, 등가의 썰기파 시험결과가 최초 하중재하로 인해 교란도 0.6 또는 과잉간극수압비 0.6 까지는 지진파와는 전단 소성변형을 상각계도의 경우에는 1.5~2배, 그리고 소성 전단일의 경우 2~3배 차이를 보였으며 이후 계속된 하중재하로부터 큰 차이를 나타내어 초기 액상화 발생시(교란도 1 또는 과잉간극수압비 1)에는 각각 8~9배와 18~20배 정도로 큰 차이를 나타냈다. 또한, 증가형 썰기파의 경우, Big Bear 시험결과를 제외하고 전반적으로 지진파 시험결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 그러므로 이 상관관계를 이용하여 액상화를 포함한 내진해석을 수행하는 경우, 상태변화전까지만을 수치해석에서 예측하더라도 실제 지진에 의한 동적변화를 효과적으로 나타낼 수 없을 뿐만 아니라 초기 액상화까지를 포함하게 되는 경우에는 해석결과와 신뢰성이 매우 크게 저하될 수 있다.



전단 소성변형률 상각계도

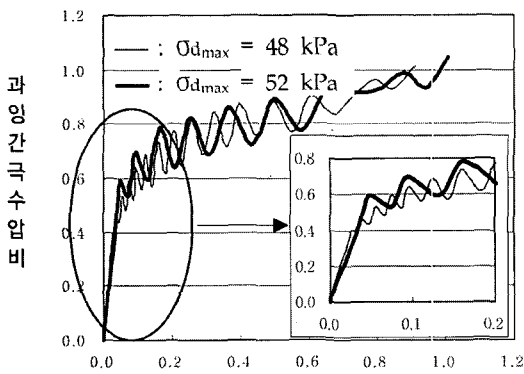
(a) 등가 썰기파



전단 소성변형률 상각계도

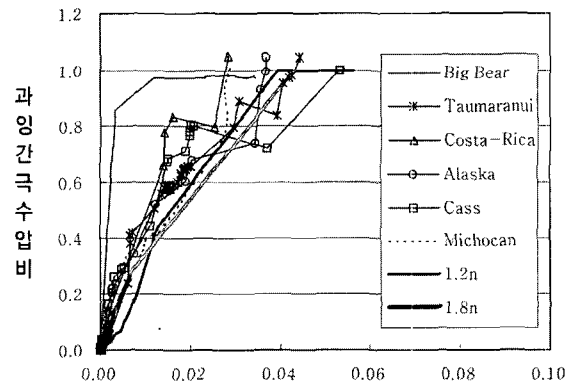
(b) 불규칙파(증가형 썰기파, 지진파)

〈그림 9〉 하중형태에 따른 교란도-전단 소성변형률 상각계도 상관관계



소성 전단일 (kN·m)

(a) 등가 썰기파



소성 전단일 (kN·m)

(b) 불규칙파(증가형 썰기파, 지진파)

〈그림 10〉 하중형태에 따른 소성 전단일-과잉간극수압비 상관관계



또한, Iai의 이론과 수정DSC이론에서는 그림 1과 그림 2에 나타난 바와 같이 응력이 0이 되는 액상화 상태이전에 갑작스럽게 액상화로 전환되는 상태가 있음을 기초로 하여 해석하고 있고 이를 액상화 상태변환선 또는 상태전환선에 의해 정의하여 그 기울기를 입력매개변수로 사용하고 있다. 그러므로, 이 기울기는 진동형태에 관계없이 고유성을 나타내어야 실제적으로 내진해석에 이용가능하게 된다. 그러나, 진동형태에 따른 상태전환선의 기울기를 조사하여 나타낸 그림 11을 보면, 전반적으로 증가형 썰기파 실험결과와 진동형 실험결과로부터 산정된 기울기는 거의 유사한 것으로 나타났으며 등가반복형의 경우에는 증가형 썰기파 및 지진파 실험결과보다 큰 값을 나타냈고 충격형 지진파의 경우는 큰 차이를 보이며 매우 작은 값을 나타냈다. 또한, 액상화 발생시 가장 큰 영향인자로 파악된 액상화 발생시 최대축차 응력을 보면, 증가형 썰기파가 가장 작았으며 등가반복형인 경우가 가장 큰 것으로 나타났다.

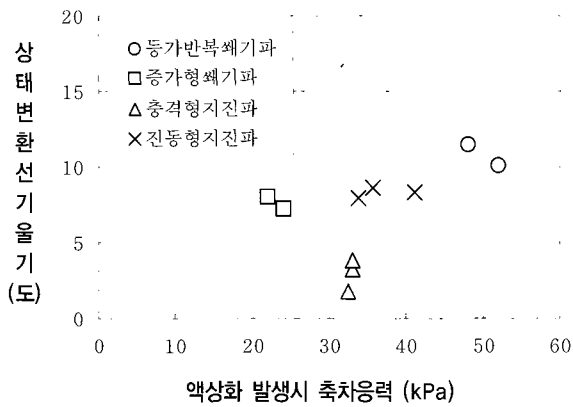
이상과 같이 기존의 유효응력개념에서 이용하는 과잉간극수압 관련파라미터에 대한 분석결과, 규칙적인 동적하중이 불규칙한 지진하중 재하시 포화사질토의 동적거동을 효

과적으로 고려하지 못하는 것으로 나타남에 따라 내진해석시 정현하중을 통해 산정된 토질점수를 이용하는 최근의 해석사례들이 부적절함을 알 수 있었다. 이에 대한 일시적인 방안으로 선형증가형 썰기파 재하시험을 통해 입력매개변수를 산정하는 것이 정현하중시험을 통하는 것보다 지진시 거동예측결과의 신뢰성이 크게 증진될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 선형증가형 썰기파가 진동형 지진파의 효과를 유사하게 모사한 반면 진동형 지진보다 국내 발생율이 2배 이상 많은 충격형 지진과는 다소 차이가 있기 때문에 이러한 일시적 방안도 적용성의 한계를 나타낼 여지가 충분하다고 판단된다. 그러므로, 지진시 지반거동예측의 신뢰성을 높이기 위해서는 기존의 유효응력개념에서 정의하고 있는 과잉간극수압과 토립자와의 상관관계가 보다 상세하게 정의되어야 한다고 판단된다.

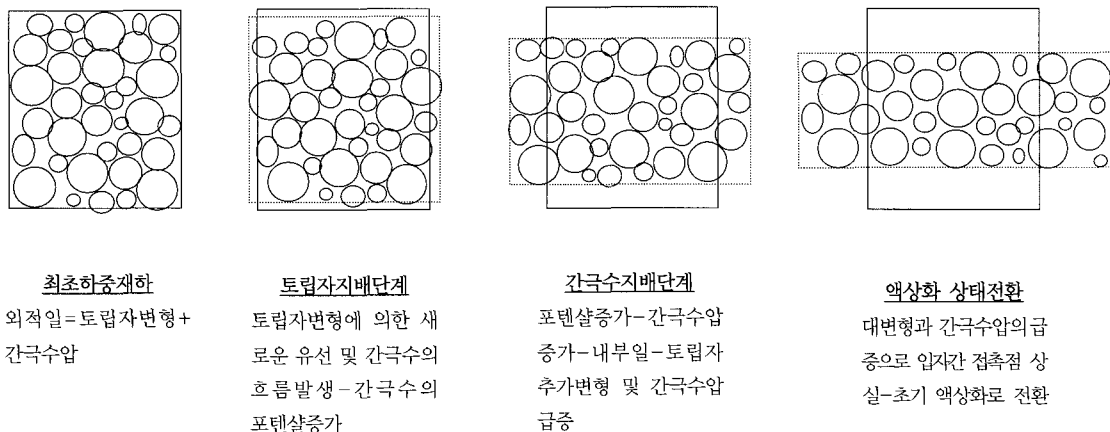
#### 4. 액상화 발생에 대한 새로운 접근방법 및 관련매개변수에 대한 타당성 검토

3.2절에서 분석된 바와 같이 기존의 유효응력해석법의 주매개변수인 소성 전단일 및 전단 소성변형률 상각계도와 과잉간극수압과의 상관관계가 하중형태에 따라 큰 차이를 보임에 따라 실제 불규칙한 지진하중을 받는 포화사질토의 정확한 동적거동예측을 위해서는 새로운 개념의 액상화 발생이론과 이를 효과적으로 정의할 수 있는 새로운 물리량이 필요할 것으로 판단된다. 이를 위해 본 연구에서는 하중의 변화, 토립자의 변형, 그리고 간극수의 동적흐름변화로 이어지는 상호관계를 상세분석하였다.

본 연구를 통해 제안된 액상화 발생에 대한 새로운 접근의 기본이론은 그림 12에 나타난 바와 같이 설명될 수 있다. 초기 동적하중이 재하되게 되면, 이 하중은 토립자에 대해 변형을 유발하게 되며 간극수의 경우, 일정부분 외력의 영



〈그림 11〉 진동형태에 따른 상태전환선의 기울기 비교



〈그림 12〉 동하중 작용시 포화사질토 내부의 토립자-간극수 상호작용에 대한 모식도

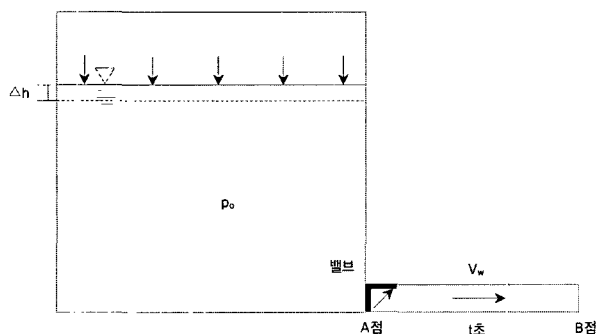
향으로 과잉간극수압의 증가를 가져오게 되지만, 토립자의 변형발생과 함께 동적흐름이 발생되어 일정부분 과잉간극수압이 소산되게 된다. 그러나, 계속된 하중재하 또는 일정수준이상의 큰 하중이 재하되어 토체의 저항력이 현저하게 떨어져 변형이 크게 발생하게 되면, 이에 따라 간극수의 동적흐름 또한 매우 빠른 속도로 이동하게 되고 이와 더불어 속도증가에 따른 큰 운동에너지를 확보하게 된다. 이때, 지진파와 같이 진동수가 매우 빠른 경우, 에너지 소산보다는 속도급증에 의한 운동에너지의 압력수두 전환으로 이어져 간극수압이 급증하게 된다. 이와 같은 과잉간극수압의 급증 후 하중이 제거될 경우, 토립자는 회복거동을 하려하지만, 간극수압이 급증한 간극수와 토립자가 내부충돌을 일으키며 추가적인 토립자의 변형이 발생할 수 있다. 이와 같이 실제 지진하중을 받는 포화사질토의 액상화 발생을 효과적으로 규명하기 위해서는 토립자의 변형에 따른 간극수의 동적흐름이 중요한 것으로 판단되며 이를 통해 과잉간극수압을 예측하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

간극수는 액체로 비배수조건에서는 토립자의 형상에 의해 액체의 형상이 결정되므로 간극수의 동적흐름만을 고려하여 설명하자면 그림 13과 같은 수리모델로부터 설명할 수 있다. 그림과 같이 압력을 받아 일정수준의 간극수압을 보유한 물탱크의 밸브를 열어 막혀있는 관까지 물을 흐르게 할 경우, 전체적인 부피변화는 없지만 순간적으로 새로운 흐름이 시작되어 정지했던 물이 속도수두를 갖게 된다. 이때, 속도수두는 초기 간극수압  $p_0$ 의 크기와 새로운 흐름의 폭, 길이 등에 의해 결정된다. 이후, 새로운 흐름을 시작하던 물이 관에 막히면서 속도수두의 압력수두로의 전환이 시작되고 이 압력이 계속적으로 물탱크 내부 전체 시스템에 전달되게 된다. 이와 같은 맥락으로 동하중을 받는 토체 시스템 내부에 적용하여 간극수압을 설명하면, 외부일에 대해 변형된 토립자로 인해 새로운 유선이 확보되면서 동적흐름이 발생되고 이 동적흐름의 수준에 따라 소산 또는 증가가 일어날 수 있으며 특히, 짧은 시간에 큰 변형이 일어나는 경

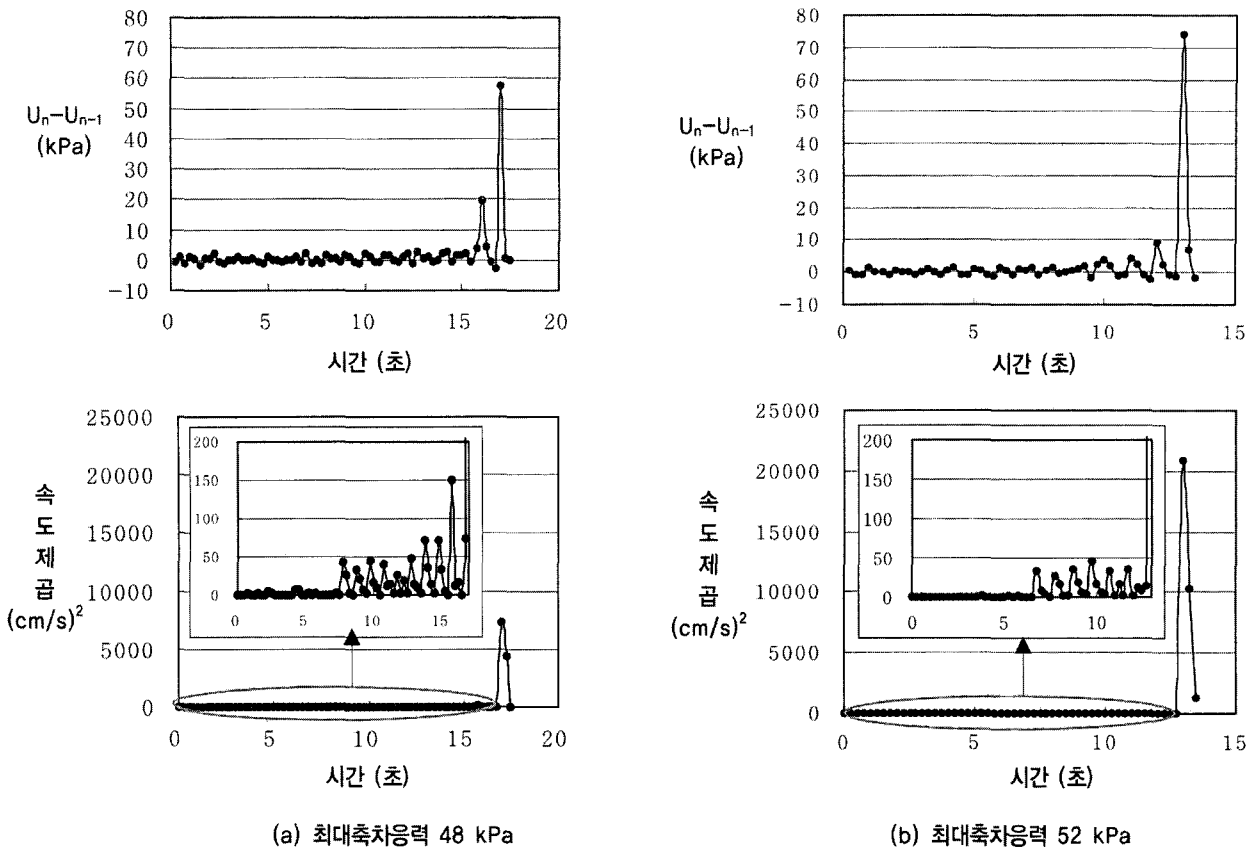
우에는 소산의 영향보다는 큰 속도수두의 압력수두로 전환이 더 큰 효과를 내면서 간극수압의 증가를 가져오게 되며 이후 토립자의 회복거동시에도 토립자와 간극수의 충돌로 인해 간극수압의 증가가 계속된다. 즉, 그림 7과 8에 나타난 간극수압의 급격한 증가는 일정수준 이상의 토립자 변형에 의해 발생하는 간극수의 동적흐름에 있으며 이 동적흐름으로 확보된 속도수두의 압력수두 전환에 의한 것으로 정의할 수 있으며 이때, 속도수두는 흐름속도의 제곱에 비례하므로 일정수준이상의 변형이 확보되면 간극수압도 변형량에 제곱에 비례하여 커질 수 있다. 또한, 비배수조건으로 한 시스템 내에서 동적흐름이 토립자의 변형에 지배를 받는 경우, 토립자의 변형을 유발하는 외부일의 하중재하주기 또한 속도수두의 증가와 관련이 되기 때문에 이를 고려해야 한다.

앞선 언급한 포화사질토의 동적거동에 관한 새로운 발생 이론의 타당성 검토를 위해 토립자의 변형량만큼 간극수의 이동거리가 증가된다는 가정아래 하중형태에 따른 전체 시험결과에 대해 토립자의 변형에 따른 간극수의 속도변화와 속도수두의 압력수두 전환을 고려한 속도의 제공값을 산정하였으며 이때, 하중방향(압축, 압축제하, 인장, 인장제하)을 고려하였다. 그 결과를 간극수압의 변화량과 비교하여 나타내면 그림 14~16와 같다. 그림에서  $y$ 축은 하중단계를 1/4 사이클로 고려한 경우의 과잉간극수압 변화량을 나타낸 것으로 아래첨자  $n$ 은 0, 0.25, 0.5, 0.75, 0.1과 같이 증가하는 하중재하횟수, 곧 하중재하시간을 의미한다.

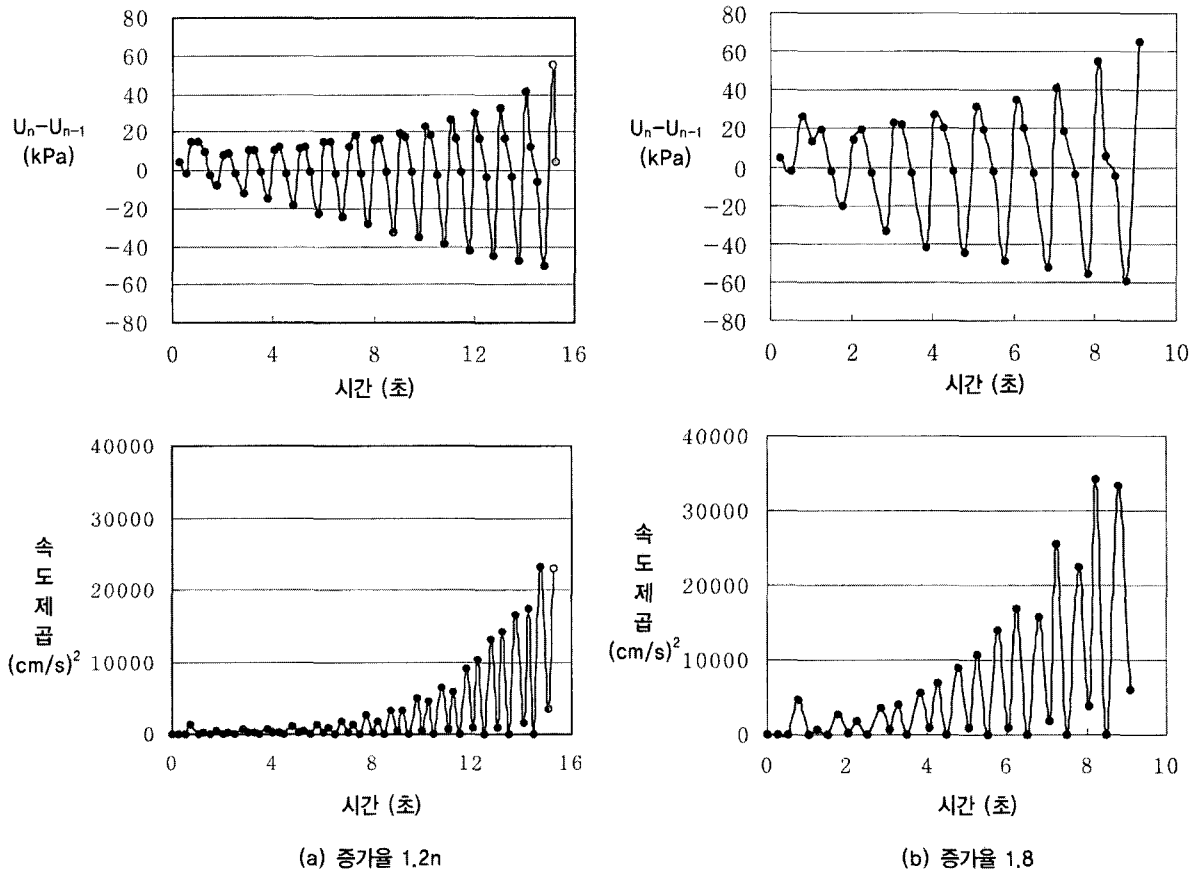
그림 14~16의 결과를 비교해 보면, 썰기파의 경우, 압축-제하-인장-제제하로 구분하여 재하방향에 따른 과잉간극수압의 변화거동이 속도변화거동과 유사하게 나타난 반면, 증가형 썰기파와 지진파의 경우에는 과잉간극수압의 재하방향에 따른 과잉간극수압의 변화거동이 전반적으로 소산거동부가 약하게 나타나면서 속도변화거동보다 속도제곱의 변화거동과 더 유사함을 보였다. 특히, 과잉간극수압의 변화가 눈에 띄는 부분을 원으로 표시한 곳을 살펴보면, 과잉간극수압의 변화를 속도수두와 관련된 물리량인 속도제곱의 값들이 정량적으로는 일정한 경향을 보이지는 못하고 있지만 변화시기만큼은 정확하게 나타내고 있는 것으로 나타났다. 이로부터 지진하중과 같은 불규칙 동하중을 받는 포화사질토 내부의 과잉간극수압은 간극수의 동적흐름에 의한 속도수두의 압력수두로의 전환에 큰 영향을 받고 있으며 동적흐름에 의한 속도수두, 즉 속도의 제곱값이 과잉간극수압을 정확하게 나타낼 수 있는 물리량을 알 수 있었다. 앞으로 동적흐름을 직선으로 고려한 가정을 보다 상세하게 규명하여 정확한 동적흐름속도를 획득하게 된다면 정량적으로도 만족한 상관관계를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.



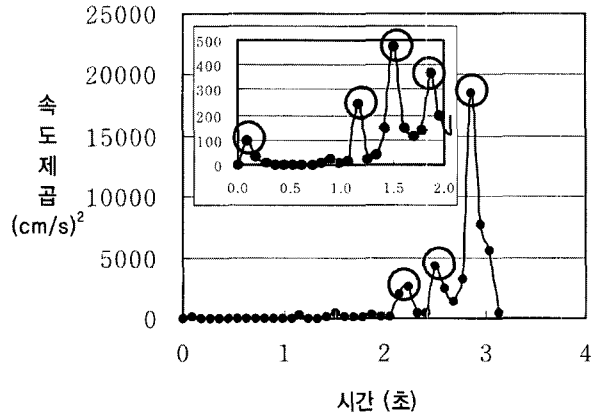
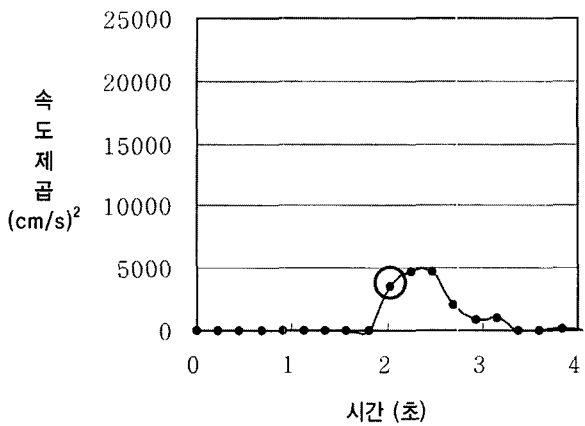
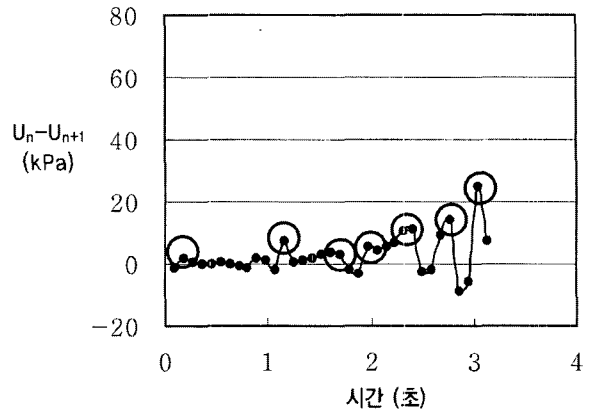
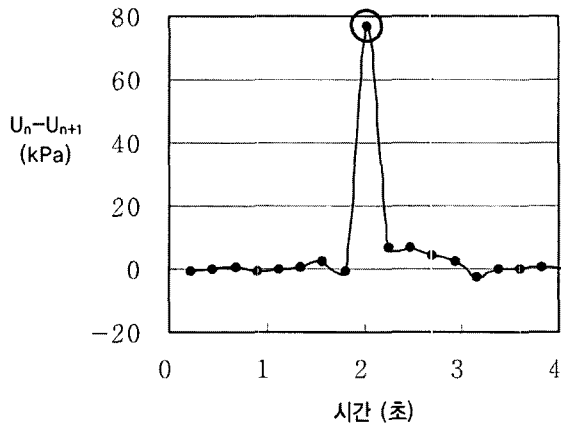
(그림 13) 새로운 유선확보 인한 동적흐름에 대한 개요도



〈그림 14〉 타당성 검토를 위한 간극수의 동적거동 분석 (등가 빼기파)

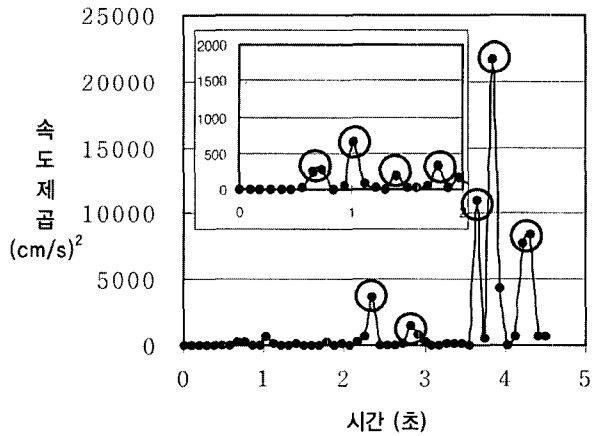
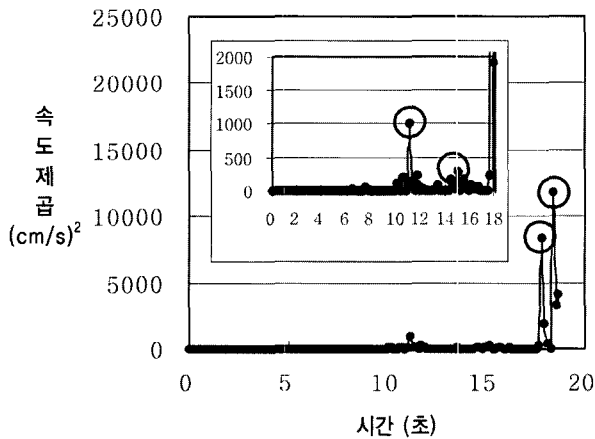
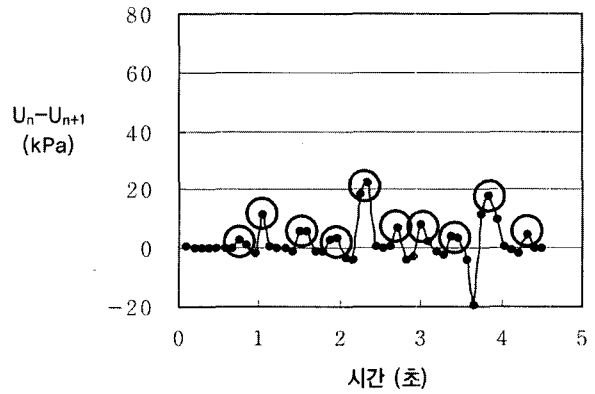
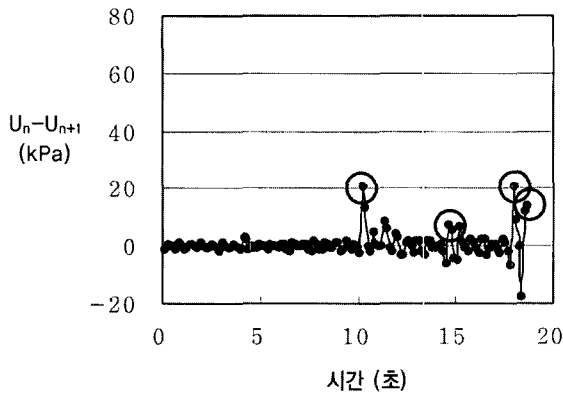


〈그림 15〉 타당성 검토를 위한 간극수의 동적거동 분석 (증가형 빼기파)



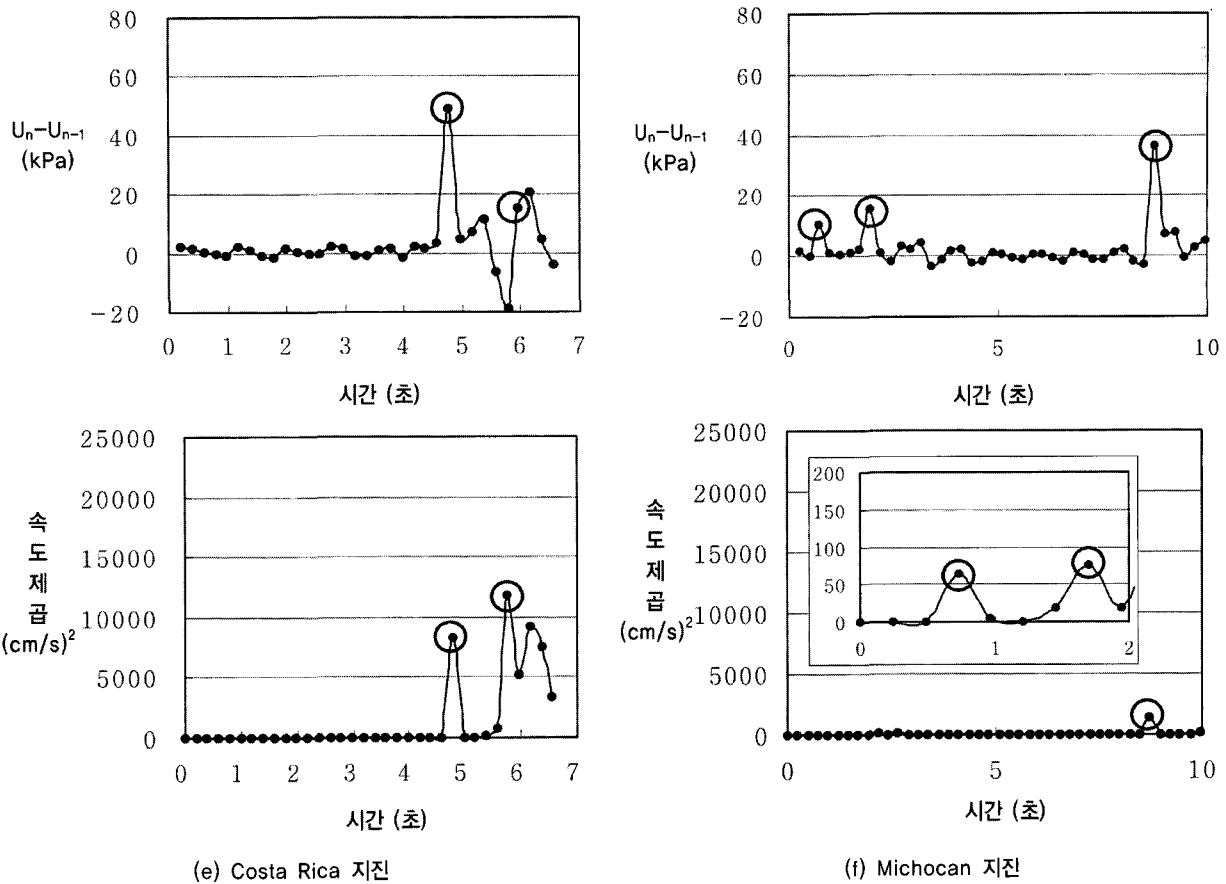
(a) Big Bear 지진

(b) Alaska



(c) Taumararui 지진

(d) Cass 지진



〈그림 16〉 타당성 검토를 위한 간극수의 동적거동 분석 (지진파)

### 5. 결론

본 연구에서는 정현파 및 등가 썩기파, 증가형 썩기파, 그리고 지진파 등 다양한 진동하중재하의 동삼축시험결과를 대상으로 액상화 발생과 관련된 여러 물리량을 상세분석하였다. 상세분석시 기존의 유효응력모델에서 과잉간극수압의 표현을 위해 이용하는 물리량인 전단 소성변형률 상각계도 및 소성일과 액상화 상태전환선의 기울기를 비교분석하였다. 분석결과, 이러한 주요 물리량이 진동형태에 따라 다른 값을 나타냄으로 기존의 유효응력해석법의 내진해석 이용이 크게 문제될 수 있는 것으로 나타나 이를 보완할 수 있도록 새로운 액상화 발생이론을 제안하였으며 추가적으로 과잉간극수압과 관련된 특성치로 동적흐름의 속도제곱에 대한 타당성을 검토하였다. 본 연구결과는 다음과 같다.

1) 기존의 유효응력해석법에서 이용하는 물리량인 전단 소성변형률 상각계도, 소성일, 그리고 액상화 상태전환선의 기울기를 비교한 결과, 등가의 썩기파 시험결과와 불규칙 동하중시험인 증가형 썩기파 및 지진파 시험결과와 큰 차이를 보였으며 증가형 썩기파 시험결과는 지진파 시험결과와 대체적으로 유사한 결과를 보였다. 그러므로,

정현파 및 등가 썩기파와 같은 규칙적인 동하중 결과를 이용하여 파라미터를 산정하는 최근까지의 내진해석사례들이 부적절하며 증가형 썩기파의 이용이 효과적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

- 2) 기존의 유효응력해석의 매개변수가 진동하중에 대해 고유성을 확보하지 못함이 밝혀짐에 따라 이를 보완하도록 간극수의 동적흐름에 중점을 두어 토립자의 변형, 간극수의 속도수두 확보, 그리고 속도수두의 압력수두 전환으로 정의되는 새로운 액상화 발생이론을 제안하였다.
- 3) 상세분석결과를 토대로 과잉간극수압의 급증을 동적흐름의 발생 및 속도수두의 압력수두로의 전환으로부터 기인한 것으로 정의하고 이와 관련된 물리량인 속도제곱의 값들을 비교분석한 결과, 불규칙성을 띤 선형증가형 썩기파와 실지진파 시험으로부터 산정된 값들의 변화거동이 급격한 과잉간극수압의 변화를 정확하게 나타냈다. 그러므로, 제안된 액상화 발생이론의 적용가능성이 충분함을 알 수 있었으며 향후, 동적흐름의 곡물손실과 이동거리가 직선적이지 못한 점 등을 충분히 고려하여 정확한 동적흐름속도를 산정할 수 있게 되면 정량적으로도 만족스러운 상관관계를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 학술진흥재단의 해외 Post-doc. 연수지원(M01-2004-000-20081-0)에 의하여 연구되었음.

## 참고 문헌

1. 한국지진공학회, 내진설계기준 연구 (II), 건설교통부, 1997.
2. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kaneoka, T., "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility," *Soil and Foundation*, JSSMFE, Vol. 32, No. 2, 1992, pp. 1-15.
3. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kaneoka, T., "Analysis of Undrained Cyclic Behavior of Sand under Anisotropic Consolidation," *Soil and Foundation*, JSSMFE, Vol. 32, No. 2, 1992, pp. 16-20.
4. Okada, N. and Nemat-Nasser, S., "Energy Dissipation in Inelastic Flow of Saturated Cohesionless Granular Media," *Geotechnique*, Vol. 44. No. 1, 1994, pp. 1-19.
5. Desai, C.S. and Rigby, D.B., "Cyclic Interface and Joint Shear Deciding Including Pore Pressure Effects," *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, 1997, pp. 568-579.
6. Desai, C.S., Park. I.J. and Shao, C., "Fundamental Yet Simplified Model for Liquefaction Instability," *Int. J. of Num. Analyt. Meth. Geomech.*, Vol. 22, 1998, pp. 721-748.
7. Desai, C.S., "Evaluation of Liquefaction Using Disturbed State and Energy Approaches," *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 7, 2000, pp. 618-631.
8. Park, I.J. and Desai, C.S., "Cyclic Behavior and Liquefaction of Sand Using Disturbed State Concept," *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 9, 2000, pp. 834-846.
9. Desai, C.S., *Mechanics of Materials and Interfaces ; The Disturbed State Concept*, CRC Press. 2001, 698pp.
10. 항안개발기술연구센터(일), 액상화로 인한 구조물 피해예측 프로그램 FLIP (Ver 3.3) 강습회 텍스트 : 동작환경과 예제, 2000, 194pp.
11. 항안개발기술연구센터(일), 액상화로 인한 구조물 피해예측 프로그램 FLIP (Ver 3.3) 강습회 텍스트 : 강습회 텍스트, 2000, 83pp.
12. 최재순, "진동형태를 달리한 포화사질토의 동적실험 결과 비교분석", 2007 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol. 11, 2007, pp. 73-80.
13. 김수일, "지진하중을 이용한 액상화 평가", 2007 한국지반공학회 봄학술발표회 초청강연 및 초록집, 2007, pp. 11-127.
14. 황선주, "다양한 입력하중에서의 액상화 발생특성 비교연구", 석사학위논문, 연세대학교, 2005, 96pp.
15. Martin, G.R., Finn, W.D. and Seed, H.B., "Fundamentals of Liquefaction Under Cyclic Loading," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 101, No. GT5., 1975, pp. 423-438.
16. 박성식, 김영수, "유효응력모델을 이용한 동적 원심모형실험의 수치해석", 한국지반공학회 논문집, 제22권, 제1호, 2006, pp. 25-34.
17. 박성식, "재액상화에 관한 원심모형실험과 수치해석", 한국지반공학회 논문집, 제22권, 제12호, 2006, pp.89-98.
18. Towhata, I. and Ishihara, K. "Modelling sil behavior under principal stress axes rotation," *Proceeding of 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, 1985, pp. 523-530.
19. 최재순, 김수일, "포화사질토의 동적거동규명을 위한 수정 교란상태개념", 2003년도 추계 학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 2003, pp. 107-114.
20. 최재순, 김수일, "정현하중재하 진동삼축시험에 기초한 포화사질토의 액상화 한계저항특성", 한국지반공학회 논문집, 20권, 8호, 2004, pp. 147-158.
21. Kramer, S.K., *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1995. 653pp.
22. Trifunac, M.D. and Brady, A.G., "A Study of the Duration of Strong Earthquake Ground Motion," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, 1975, pp. 581-626.
23. Ishihara, K. and Perlea, V. "Liquefaction-associated soil damage during the Vrancea earthquake of March 4," *Soils and Foundation*, JSSMFE, Vol. 24, No. 1, 1984, pp. 90-112.