

# 액상화된 모래지반의 과잉간극수압 소산모델 개발

## Development of Dissipation Model of Excess Pore Pressure in Liquefied Sand Ground

김 성 렬<sup>1</sup> Kim, Sung-Ryul

황 재 익<sup>2</sup> Hwang, Jae-Ik

고 혼 임<sup>3</sup> Ko, Hon-Yim

김 명 모<sup>4</sup> Kim, Myoung-Mo

### Abstract

Recently, many researches on the dissipation of excess pore pressure in liquefied sand grounds have been performed to evaluate post-liquefaction behavior of structures. In this research, centrifuge tests were performed to analyze liquefaction behavior of level saturated sand grounds. Based on the test results, the evaluation model of solidified layer thickness was developed to simulate non-linear variation of the thickness with time. The thickness evaluation model was combined with the solidification theory and the consolidation theory in order to simulate dissipation of excess pore pressure. The suggested dissipation model properly estimated the solidified layer thickness and the time history of excess pore pressure.

### 요 지

최근 액상화 이후의 구조물 거동에 관심이 높아지면서, 액상화 지반의 과잉간극수압 소산에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 포화된 수평모래지반에 대한 원심모형실험을 수행하여 액상화 이후의 과잉간극수압 소산거동을 예측하고 예측결과를 바탕으로 견고화층의 비선형적인 두께 변화에 대한 예측모델을 제안하였다. 기존의 침강이론과 압밀이론에 이 예측모델을 결합함으로써 과잉간극수압 소산을 모델링하는 새로운 소산 예측모델을 개발하였다. 개발된 소산모델은 원심모형실험 결과와 비교하여 견고층 두께 증가와 과잉간극수압 소산양상을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Centrifuge test, Consolidation theory, Dissipation of excess pore pressure, Liquefaction, Solidification theory

### 1. 서 론

1964년 Niigata 지진시 최초로 액상화 현상이 발견된 이후로 약 40년에 걸쳐 많은 연구자들이 지반 액상화 현상에 대하여 연구하여 왔다. 지금까지는 대부분 액상화 발생 가능성의 판정과 액상화 발생이 지반 및 구조물에 미치는 영향 등에 대한 연구가 중점적으로 이루어져 왔다. 그러나, 최근 성능에 기초한 설계개념(performance

-based design)이 도입되면서 액상화 발생여부 뿐 아니라, 액상화가 발생한 이후의 구조물 거동을 예측함으로써 구조물의 최종적인 성능을 평가하려는 연구가 진행되고 있다. 지반의 액상화 거동은 기본적으로 지반 내의 과잉간극수압 크기에 지배된다. 그러므로, 액상화 이후의 거동을 연구하려면 진동이 끝난 후의 과잉간극수압소산거동을 정확히 예측하는 것이 필수적이다. 현재까지 일부 연구자들이 진동대 실험결과를 토대

1 정희원, 동아대학교 토목공학부 조교수 (Member, Assistant Prof. Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.)

2 정희원, 삼성건설 토목사업본부, 과장 (Member, Senior Engineer, Samsung Engineering & Construction)

3 Prof. Univ. of Colorado, Boulder, Colorado, USA

4 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., The school of Civil, Urban & Geo-System, Seoul National Univ., geotech@snu.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

로 액상화 지반의 과잉간극수압 소산모델 등을 제안하고 있다. Florin과 Ivanov(1961)는 소형토조를 이용한 모래지반의 액상화 실험을 수행하여 과잉간극수압 소산과 침하를 모델링할 수 있는 침강이론(solidification theory)을 제안하였다. 침강이론은 액상화된 모래지반이 침강에 의해 견고화된 층을 형성한 후 과잉간극수압이 점차 소산된다는 이론이다. 이 후 Kokusho(1999)과 하익수 등(2003)의 연구에 의해 침강이론은 액상화 지반의 과잉간극수압 소산과정을 모사하는데 매우 유용한 것으로 밝혀졌다.

한편, Scott(1986)는 침강에 의해 형성된 견고층이 압축성을 지니고 있으므로, 견고층 내부에 추가적인 과잉간극수압이 존재한다고 제안하였다. 그는 침강이론과 압밀이론을 결합한 소산이론을 제안하였으며 수평지반에 대한 원심모형실험 결과와 비교하여 제안된 이론의 유효성을 검증하였다. 그러나, 그의 연구는 견고층이 형성되는 속도가 깊이에 따라 일정하다고 가정하는 등의 한계점이 있었다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 원심모형실험을 수행하여 원지반의 높은 구속압이 액상화 거동에 미치는 영향을 고려하였고, 과잉간극수압의 깊이별 분포 및 소산과정을 엄밀히 계측하였다. 또한, 4가지 다른 입도분포를 갖는 흙에 대한 실험을 수행하여 입도분포가 소산과정에 미치는 영향을 함께 분석하였다. 본 연구의 원심모형실험 결과를 바탕으로 깊이에 따라 견고층이 형성되는 속도를 비선형적으로 고려할 수 있도록 Scott의 소산이론을 수정한 소산모델을 개발하고, 개발 모델의 적용성을 검증하고자 한다.

## 2. 액상화 지반의 과잉간극수압 소산 모델

### 2.1 기존의 연구

Florin과 Ivanov(1961)는 대기압(1-g) 하에서 충격하중시험과 진동시험을 수행하여 액상화 지반의 과잉간극수압 소산과 침하를 모델링할 수 있는 침강이론(solidification theory)을 제안하였다. 그림 1은 충격하중에 의해 액상화가 발생한 지층(두께  $H_s$ )의 과잉간극수압 소산거동을 보여준다. 진동이 끝나면 하부영역에서부터 흙입자들이 침강하면서 서로 접촉을 하게 되고 과잉간극수압이 감소하기 시작한다. 액상화가 유지되는 상부영역과 침강에 의해 견고화된 하부영역의 경계면을 견

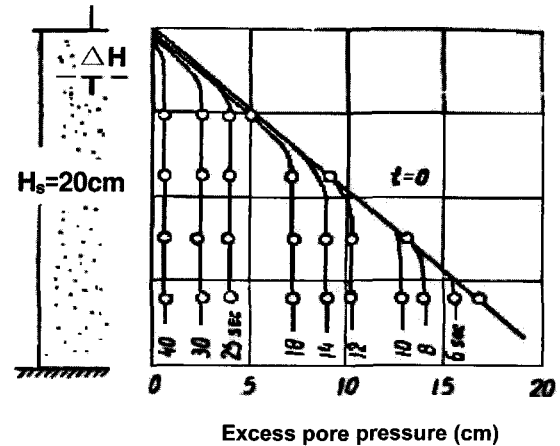


그림 1. 충격시험에 의한 과잉간극수압 발생과 소산거동(Florin과 Ivanov, 1961)

고층전면(solidification front)이라고 하며 견고층전면은 과잉간극수압의 소산이 진행됨에 따라 하부에서부터 지표면으로 이동하게 된다.

Florin과 Ivanov는 견고층전면의 이동속도(침강속도)는 일정하고, 견고층전면이 지표면에 도달할 때 소산이 완료되며, 견고화된 영역이 비압축성이라는 가정 하에서 견고층 내부의 과잉간극수압 크기는 견고층전면에서의 과잉간극수압 크기와 동일하다고 제안하였다. 한계상태이론에 따르면 동일한 밀도를 가진 흙의 경우 지반구속압이 증가하면 흙의 압축성도 증가하게 된다. 즉, 지반 구속압이 작아서 견고화된 층의 압축성의 영향이 작다면 그림 1에서 보인 바와 같이 견고층 내부의 과잉간극수압 크기는 동일할 수 있지만, 지반 구속압이 크다면 흙은 투수계수가 유한하고 압축성을 지니고 있으므로 견고층이 형성된 후 자중압밀의 개념처럼 견고층의 자중과 압축성에 의해 추가적인 과잉간극수압이 토층 내에 존재한다. Scott(1986)는 견고층 내의 추가적인 과잉간극수압 소산 영향을 모델링하기 위해 침강이론과 점토층에 대한 고전압밀이론을 복합한 이론을 제안하였으며 수평지반에 대한 원심모형실험 결과와 비교하여 제안된 모델의 유효성을 검증하였다. 그러나, 그는 침강속도가 전 깊이에서 일정하다고 가정하였고 전체 과잉간극수압 소산과정과 깊이별 과잉간극수압 분포를 정확하게 계측하지 못하여 압밀에 의한 소산과정을 정밀하게 분석하지 못하였다.

### 2.2 소산모델의 개발

본 연구에서는 기존 과잉간극수압 소산 모델을 개선

하기 위해 견고층 두께 증가에 대한 비선형 모델을 개발하고 이를 Scott(1986)의 모델과 결합하여 액상화 지반에 대한 새로운 과잉간극수압 소산모델을 제안하였다.

### 1) 견고층 두께 증가모델

지금까지의 침강이론은 견고층의 두께 증가속도가 깊이에 따라 일정한 것으로 가정하였다. 그러나, 본 연구에서 수행한 원심모형실험 결과로부터 액상화 후 과잉간극수압 소산이 시작되는 견고화 시점을 표시해본 결과 그림 2와 같이 견고층의 두께 증가속도는 깊이에 따라 다른 것으로 나타났다(김성렬 등, 2006). 즉, 견고층 두께 증가속도가 깊이가 깊은 곳에서는 빠르고 깊이가 얇아질수록 점차 느려지는 것을 알 수 있다. 그러므로, 본 논문에서는 이러한 견고층 두께의 비선형적인 증가속도를 고려하기 위해 식(1)의 hyperbolic 모델을 제안하였다.

제안식의 입력변수 중 변수  $c$ 는  $t \rightarrow \infty$ 일 때의 지표면 근처의 최종적인 견고층 두께 증가속도를 나타내며, 변수  $a$ 는 바닥면 근처에서의 초기 견고층 두께 증가속도를 묘사하는데 이용된다.

$$H = \frac{t}{a + b \cdot t} + c \cdot t \quad (1)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{a}{(a + bt)^2} + c;$$

$$t=0 \text{ 이면 } \frac{dH}{dt} = \frac{1}{a} + c,$$

$$t \rightarrow \infty \text{ 면 } \frac{dH}{dt} = c \quad (2)$$

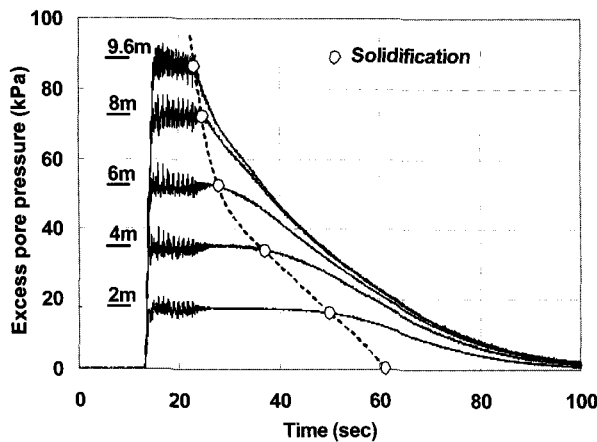


그림 2. 깊이에 따른 견고화 시점의 변화 (김성렬 등, 2006)

여기서,  $H$  : 바닥면으로부터 견고층의 두께

$a, b$  : 바닥면 근처에서의 초기 견고층 두께 증가속도를 나타내는 계수

$c$  : 지표면 근처에서의 최종 견고층 두께 증가속도를 나타내는 계수

### 2) 과잉간극수압 소산모델

본 연구에서는 Scott(1986)가 제안한 방법에 식 (1)의 견고층 두께 증가모델을 결합하여 새로운 과잉간극수압 소산모델을 제안하였다. Scott(1986)는 그림 3과 같이 액상화된 층의 두께가  $H_s$ 이고 견고층전면이 높이  $H$ 에 도달했을 때 견고층 내부의 과잉간극수압은 깊이에 따라 일정한 크기의 과잉간극수압( $\overline{AB}$ )과 흙의 압축성에 의한 추가적인 과잉간극수압( $\overline{BC}$ )으로 구성된다고 제안하였다. 그는 점성토에 대한 고전압밀이론과 침강이론을 결합하여 식 (3)을 제안하였다. 식 (3)은 그림 3에서 견고층전면이 바닥면으로부터 높이  $H$ 에 도달하였을 때 견고층 내부의  $d$  높이에서의 과잉간극수압  $u$ 를 산정하는 식이다.

$$u = \overline{AB} + \overline{BC} = \gamma' (H_s - H) + u_G \quad (3)$$

여기서,  $\overline{AB}$  = 견고층전면에서의 과잉간극수압 =  $\gamma' (H_s - H)$

$\gamma'$  = 흙의 수중단위중량

$\overline{BC}$  = 견고층 내부의 압밀현상에 의한 추가 과잉간극수압 =  $u_G$

$H_s$  = 전체 액상화층의 두께

$H$  = 바닥으로부터 견고층의 높이

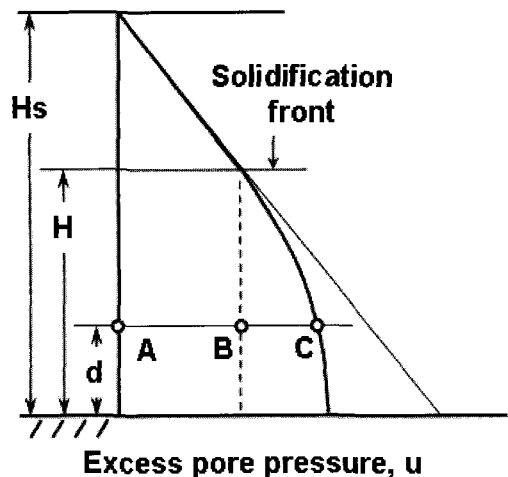


그림 3. 견고층의 압축성이 존재할 때의 과잉간극수압 분포도(Scott, 1986)

견고층 내부에 존재하는 추가적인 과잉간극수압  $u_G$  는 소산과정 중 견고층의 두께가 점차 증가하고 견고층 내부의 과잉간극수압이 흙의 유한한 투수계수와 압축성때문에 완전히 소산하지 못하기 때문에 발생한다. 이것은 시간에 따라 점토층의 두께가 점차 증가하는 압밀현상과 동일하다. Gibson(1958)은 이러한 압밀현상을 모사하기 위해 식 (4)와 같은 압밀 지배방정식을 제안하였다.

$$c_v \frac{\partial^2 u_G}{\partial z^2} = \frac{\partial u_G}{\partial t} - \gamma' \frac{dH}{dt} \quad (4)$$

여기서,  $c_v$  = 과잉간극수압 소산을 나타내는 압밀계수  
 $H$  = 압밀층 두께 (견고층 두께)

Gibson은 압밀층(견고층)의 두께 증가속도  $dH/dt$ 가 일정한 경우에 대하여만 이론해를 제시하였기 때문에 Scott는 견고층 두께의 증가속도가 깊이에 상관없이 일정하다고 가정한 후 Gibson이 제안한 이론해를 적용하여  $u_G$ 를 산정하였다. 그러나, 본 연구에서 제시한 바와 같이 견고층 두께 증가속도( $dH/dt$ )는 깊이가 깊은 곳에서는 빠르게 지표면에 가까워질수록 느려지는 비선형적 변화를 나타내는데, 식 (4)에서 견고층 두께 증가속도가 비선형적으로 변하는 경우에 대한 이론적인 정해는 산정할 수 없다.

그러므로, 본 연구에서는 수치해석적 기법을 적용하여  $dH/dt$ 가 비선형적으로 변하는 경우에 대하여 식 (4)의  $u_G$ 값을 산정하였다. 식 (4)를 유한차분식 형태로 나타내면 식 (5)와 같이 된다. 이 유한차분식은 경계면에서의 과잉간극수압 값과  $t$ 시간에서의  $u_G$ 값을 알면 비선

형적인 층두께 변화를 고려하여  $t+dt$  시간에서의  $u_G$ 값을 산정할 수 있다.

$$u_G(z,t+dt) = u_G(z,t) + \beta (u_G(z+dz,t) + u_G(z-dz,t) - 2u_G(z,t)) + \gamma' dH \quad (5)$$

여기서,  $\beta = c_v dt / (dz)^2$

$dH$  : 시간  $dt$  동안 증가되는 층두께

식 (5)를 이용하여 개발된 유한차분 해석 프로그램의 유효성은 층 두께 증가속도가 일정한 경우에 대하여 Gibson의 이론해와 비교하여 검증하였다. 그림 4는 층 두께가 증가함에 따라 층 내부의 과잉간극수압이 증가하는 것을 보여주는데 이론해와 계산결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

### 3. 원심모형실험 개요

본 원심모형실험은 미국 콜로라도주 보울더 소재의 Colorado 대학에서 보유하고 있는 대형 원심모형실험기 (capacity : 400g·ton, radius : 5.4m)를 이용하여 수행하였다. 원형지반은 10m 두께의 포화된 수평 모래지반으로 가정하였다. 표 1은 본 실험에 적용된 상사법칙을 보여준다. 본 실험의 원심가속도는 40g이며 모형지반의 두께는 25cm이므로, 본 실험에서 모사하는 원지반의 두께는 10m가 된다. 입력가속도는 sin파형이며 진폭, 진동수, 그리고 지속시간은 원형스케일로 각각 0.2g, 1 Hz, 그리고 10초이다.

그림 5는 실험단면 및 계측기 배치를 보여준다. 본 실험에서 이용한 계측기는 LVDT, 가속도계, 그리고 간극수압계로서 각각 지표면 수직침하계측, 진동대의 수평 및 수직가속도와 깊이별 지반 가속도 측정, 그리고 지반내 과잉간극수압 측정에 이용하였다.

원심모형실험 수행에 이용한 모형토조의 크기는 길이 40.6cm × 폭 21.6cm × 높이 34.3cm이며, 두께 약

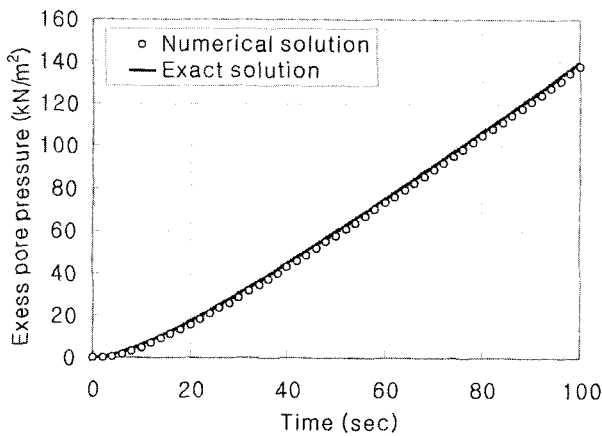


그림 4. 이론해와의 비교를 통한 프로그램의 검증 ( $c_v=0.5 \text{ m}^2/\text{sec}$ ,  $dH/dt=0.25 \text{ m}/\text{sec}$ ,  $\gamma'=8 \text{ kN}/\text{m}^3$ ,  $dH/dt=0.25 \text{ m}/\text{sec}$ )

표 1. 실험에 적용된 상사법칙(원심가속도 = 40g)

	상사비(원형/모형)	모형	원형
지반두께	40	25cm	10m
진동시간	40	0.25초	10초
입력가속도 진폭	1/40	8g	0.2g
입력가속도 진동수	1/40	40Hz	1Hz

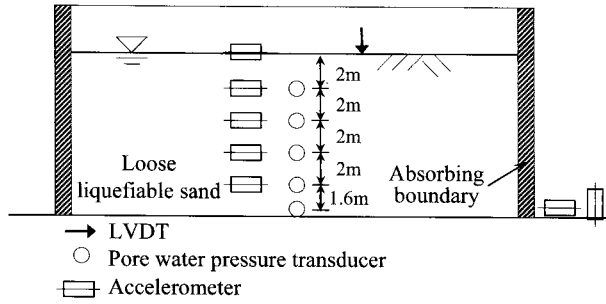


그림 5. 원형크기로 환산된 실험 단면과 계측기 배치 (원형 축척)

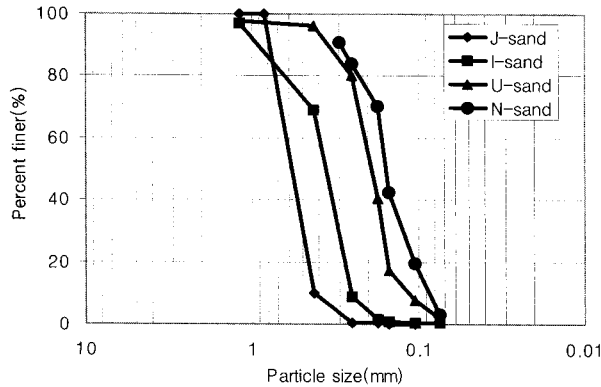


그림 6. 4가지 실험모래의 입도분포곡선

표 2. 실험에 이용된 모래의 입도분포 특성 및 최대, 최소 단위중량

	J-sand	I-sand	U-sand	N-sand
$D_{10}$ (mm)	0.425	0.252	0.116	0.087
$D_{60}$ (mm)	0.63	0.39	0.208	0.166
$D_{30}$ (mm)	0.5	0.3	0.164	0.125
균등계수, $C_u$	1.48	1.54	1.79	1.91
곡률계수, $C_c$	0.93	0.91	1.11	1.08
최소단위중량, $\gamma_{d,min}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	13.3	13.4	13.1	14.1
최대단위중량, $\gamma_{d,max}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	16.6	17.0	17.1	17.6

표 3. 진동횟수에 따른 각 모래의 포화단위중량과 상대밀도 변화

	J-sand		I-sand		U-sand		N-sand	
	$\gamma_{sat}^{(1)}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Dr (%)	$\gamma_{sat}^{(1)}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Dr (%)	$\gamma_{sat}^{(1)}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Dr (%)	$\gamma_{sat}^{(1)}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Dr (%)
Initial	19.16	49.3%	19.38	52.2%	19.29	52.2%	19.92	54.3%
1st	19.34	58.1%	19.57	60.4%	19.53	61.7%	20.04	59.9%
2nd	19.47	64.2%	19.72	66.8%	19.71	68.3%	20.14	64.2%
3rd	19.57	68.7%	19.82	71.0%	19.82	72.5%	20.22	67.6%
4th	19.66	72.8%	19.90	74.3%	19.90	75.4%	20.28	70.0%
5th	19.72	75.4%	19.97	77.0%	19.96	77.5%	20.34	72.3%

<sup>1)</sup> 지표 침하량 측정결과로부터 단위중량 변화를 계산함

12.7mm의 알루미늄 판으로 제작하였다. 토조에 물을 채운 후 토조상부에 철망을 놓고 철망위에서 모래를 강사하였다. 철망을 이용하여 모래강사높이를 일정하게 유지함으로써 균일한 밀도의 지반이 조성되도록 하였다. 그리고, 진동방향 토조의 양벽면에 지반과 토조 강성벽체간의 충돌 때 발생하는 충격파를 방지하기 위해 약 1cm 두께의 코르크판을 부착하였다.

모래의 입도분포가 액상화 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 각기 다른 입도분포를 가지는 총 4가지 종류의 모래를 이용하였다. 실험에 이용된 모래는 주문진 표준사(J-sand), 인천 모래(I-sand), 울진 모래(U-sand), 그리고 네바다 모래(N-sand)의 4가지 모래이다. 각 흙의 입도분포 특성은 그림 6 및 표 2에 나타내었다.

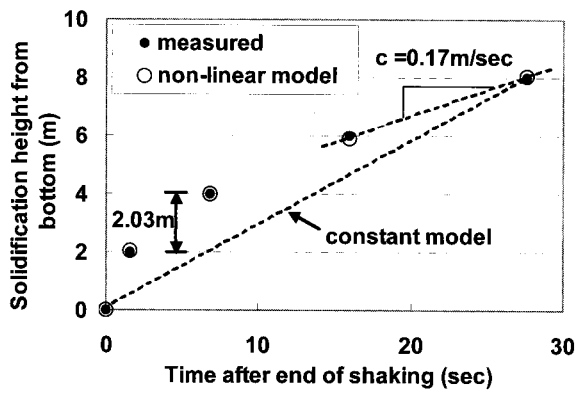
실험은 동일한 지반에 대하여 sine 파를 총 5번 순차적으로 가하여 지반의 상대밀도 변화가 소산에 미치는 영향을 분석하였고, 이전의 진동에 의해 발생한 과잉간극수압의 소산이 완료된 후 다음 진동을 가하였다. 표 3은 진동횟수에 따른 각 모래의 포화단위중량( $\gamma_{sat}$ )과 상대밀도(Dr) 변화를 보여준다. 초기 상대밀도의 범위는 49% ~ 54% 정도로 나타났다. 진동횟수가 증가함에 따라 점차 지반이 조밀해였으며, 5번 째의 최종 진동 후의 상대밀도는 72%~ 77%로 나타났다.

## 4. 소산모델 입력변수값의 선정

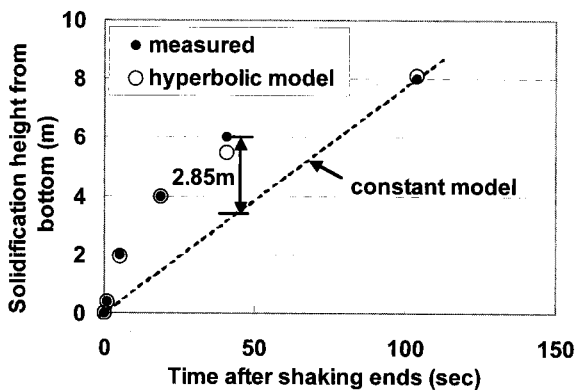
### 4.1 견고층 두께 증가모델의 입력변수 선정

비선형적인 견고층 두께 증가속도를 선정하는 식 (1)에 필요한 입력변수는 a, b, c의 3가지이다. 본 절에서는 원심모형실험에서 얻어진 견고층 두께 증가속도를 최적으로 모사할 수 있는 a, b, c 변수값들을 결정하였다.

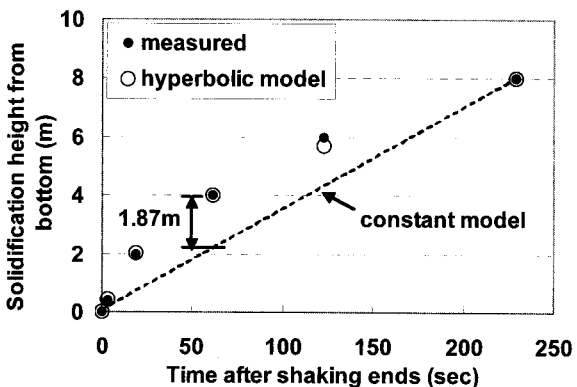
그림 7은 각 모래의 시간에 따른 견고층 두께변화의 측정값과 예측값을 비교하여 보여준다. 먼저 각 실험결과에 대하여 변수 c값을 선정하였다. 변수 c는 지표면 근처에서의 최종적인 견고층 두께 증가속도를 나타내므로 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 계측결과로부터 지표면 근처에서의 두께증가속도를 계산하여 결정하였다. 그 후 변수 a와 b 값을 변화시켜가며 측정된 곡선과 예측곡선이 가장 근접할 때의 값을 결정하였다. 이러한 방법으로 hyperbolic 모델의 입력변수값들을 적절히 선택할 경우 그림 7의 결과에서 볼 수 있듯이 견고층 두께증가속도를 정확하게 예측할 수 있었다.



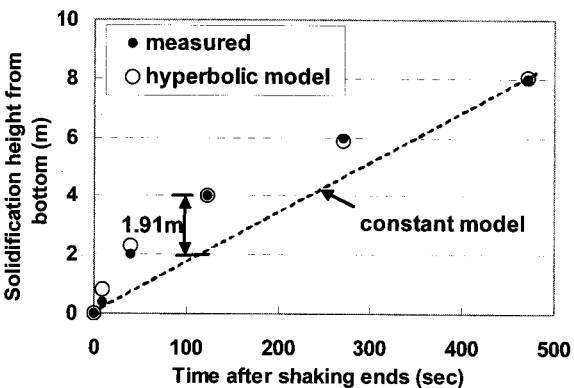
(a) J-sand ( $a=0.44$  sec/m,  $b=0.29$  1/m,  $c=0.17$  m/sec)



(b) I-sand ( $a=1.95$  sec/m,  $b=0.19$  1/m,  $c=0.032$  m/sec)



(c) U-sand ( $a=6.77$  sec/m,  $b=0.24$  1/m,  $c=0.019$  m/sec)



(d) N-sand ( $a=10.02$  sec/m,  $b=0.28$  1/m,  $c=0.01$  m/sec)

그림 7. 견고층 두께증가모델의 입력변수 산정(1번째 진동)

한편, 그림 7에서 본 연구에서 제안한 hyperbolic 모델과 기존에 제안된 constant 모델의 유효성을 비교할 수 있다. constant 모델은 전체 깊이에 대하여 견고층 두께 증가속도를 일정하게 가정하므로 동일한 시점에서의 견고층 두께의 예측값과 계측값은 크게 차이난다. constant 모델을 이용할 경우 견고층 두께 실측값에 대한 최대 오차는 그림에 나타낸 바와 같이 J-sand의 경우 2.03m, I-sand의 경우 2.85m, U-sand의 경우 1.87m, 그리고 N-sand의 경우 1.91m인데 비하여 hyperbolic 모델의 최대오차는 모든 경우에서 0.5m 미만이었다. 본 결과는 기존 constant 모델에 비하여 hyperbolic 모델이 견고층 두께 증가속도를 훨씬 정확하게 예측하는 것을 보여준다.

#### 4.2 압밀계수의 산정

그림 8은 과잉간극수압 소산을 모사하기 위해 압밀계수  $c_v$  값을 결정하는 과정을 보여준다. 그림의 계측결과는 J-sand의 9.6m 깊이에서의 과잉간극수압 소산결과이다.  $c_v = 1\text{m}^2/\text{sec}$ 인 경우 계측결과에 비해 계산된 소산속도가 느린 것으로 나타났다.  $c_v$  값을 증가시켜본 결과  $c_v$  값이  $2\text{m}^2/\text{sec}$ 가 되었을 때 침강속도의 계측값과 예측값이 잘 일치하였다. 이러한 반복계산으로 각 모래의 소산결과를 최적으로 모사할 수 있는 압밀계수 값을 결정하였다.

#### 4.3 입력변수 산정식 개발

4.1절과 4.2절의 절차를 이용하여 결정된 각 모래의 진동 횟수에 따른 입력변수 값들과 흙의 입도분포 특성 및 상대밀도에 대한 상관관계를 분석하여 소산모델의

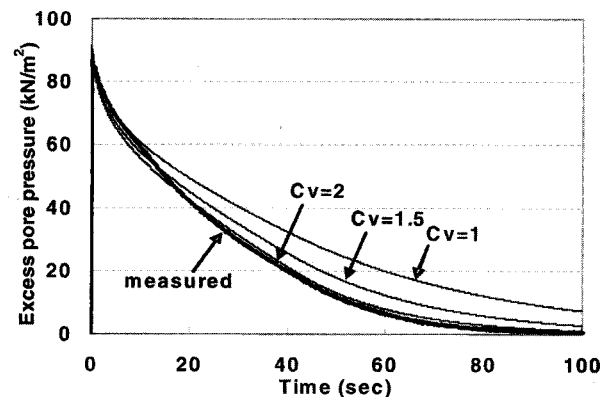


그림 8. 소산모델의 압밀계수 산정 (J-sand, 깊이=9.6m,  $a=0.44\text{sec/m}$ ,  $b=0.29$  1/m,  $c=0.17$  m/sec)

입력변수 산정식을 제안하고자 한다. 흙의 입도특성의 경우 많은 시행착오를 통한 분석결과 흙의 입도분포 특성을 나타내는 여러 변수들 중 30% 통과중량 백분율에 해당하는 입경  $D_{30}$ 이 흙의 소산특성과 가장 큰 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

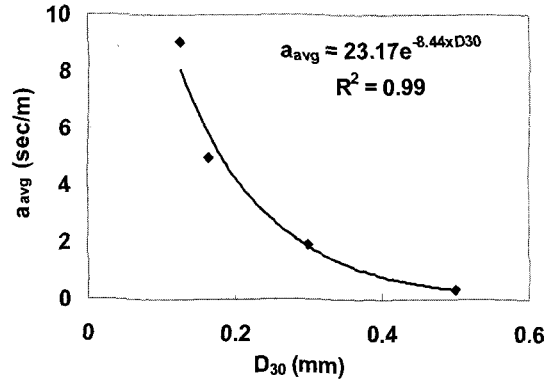
그림 9(a)는 흙의 입도특성인  $D_{30}$ 과 변수 a의 평균값  $a_{avg}$ 의 관계로서, 흙의 입경이 커질수록  $a_{avg}$  값이 지수함수 형태로 감소하였다.  $a_{avg}$ 는 토조 바닥면 근처에서의 소산속도를 산정할 수 있었던 1번째와 2번째 진동 자료의 평균값이다. 그림 9(b)는  $a_{avg}$ 값을 흙의 상대밀도( $Dr$ )에 대하여 보정하는 계수  $F_a$ 를 보여준다. 이 보정계수  $F_a$ 는 각 진동에서 얻어진 a값을  $a_{avg}$ 로 나눈 값으로 정의된다. 그림을 보면 상대밀도가 증가할 수록  $F_a$ 값이 작아져 a값이 작아지므로 견고층 두께 증가속도가 증가하게 된다. 즉, 식 (1)의 hyperbolic 모델에서 흙의 입경이 커지고 흙의 상대밀도가 증가할수록 a값이 감소하므로 견고층 두께 증가속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 최종적인 변수 a값은 그림 9(a)에서  $D_{30}$ 에 해당하는  $a_{avg}$ 값을 구하고, 그림 9(b)에서  $F_a$ 를 구한 후  $a_{avg}$ 와  $F_a$ 를 곱하여 산정한다.

변수 b와 c값도 변수 a와 동일한 방법을 이용하여 흙 입경과 변수 평균값의 관계 그리고 상대밀도와 보정계수의 관계를 구하여 변수 산정식을 개발하였다.

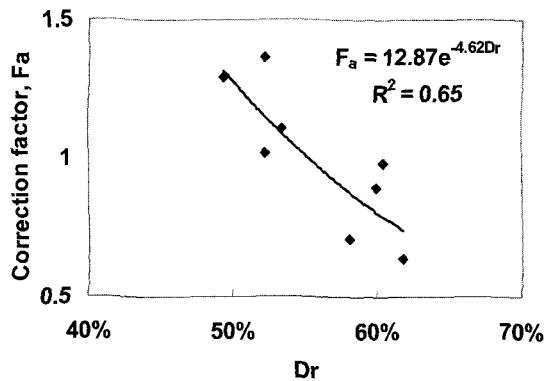
그림 10(a)는  $D_{30}$ 과 변수 b의 평균값  $b_{avg}$ 의 관계로서  $b_{avg}$ 는 흙의 입경과 별다른 상관성이 없었으며 전체 평균값은 0.25로 나타났다. 그림 10(b)를 보면  $b_{avg}$ 의 보정계수  $F_b$ 값은 흙의 상대밀도에 관계없이 일정한 값을 가진다. 그러므로, 변수 b값은 흙의 종류 및 상대밀도에 관계없이 평균값인  $b=0.25$ 를 적용하는 것으로 결정하였다.

그림 11은 변수 c의 산정곡선을 나타낸다. 지표면 근처의 소산속도 c값은 각 모래의 모든 실험자료로부터 산정할 수 있었기 때문에 모든 실험자료들을 활용하여 변수 c의 평균값  $c_{avg}$ 와 보정계수  $F_c$ 를 산정하였다. 변수 a와 마찬가지로 그림 11(a)에서  $D_{30}$ 에 해당하는  $c_{avg}$ 값을 구하고, 그림 11(b)에서 흙의 상대밀도에 해당하는 보정계수  $F_c$ 를 구한 후 두 값을 곱하여 최종적인 c값을 산정한다.

그림 12는 압밀계수  $c_v$ 와  $D_{30}$ 의 제곱값의 상관곡선으로 압밀계수는  $D_{30}^2$ 값에 선형적으로 비례하는 것으로 나타났다. 압밀계수  $c_v$ 값의 경우 상대밀도 보정계수를 제안하지 않았는데, 그 이유는 진동횟수가 증가함에 따

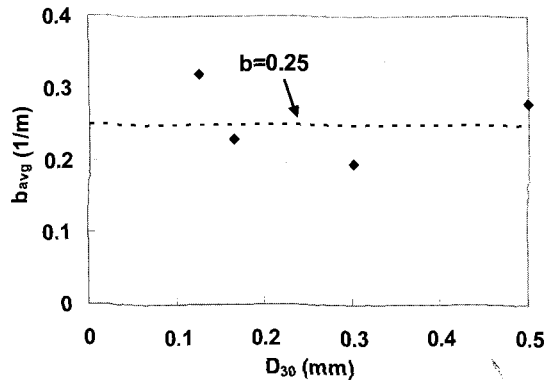


(a)  $a_{avg}$ 와  $D_{30}$ 의 상관관계

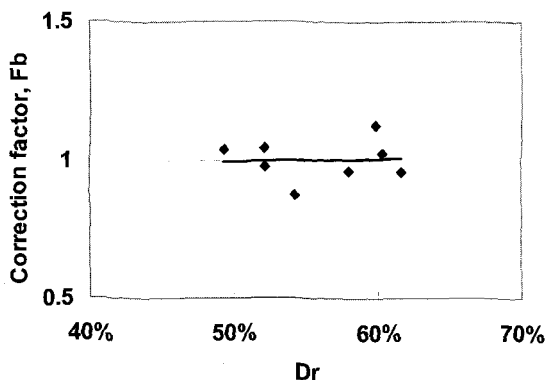


(b) 상대밀도에 대한 보정계수  $F_a$

그림 9. 변수 a의 산정곡선

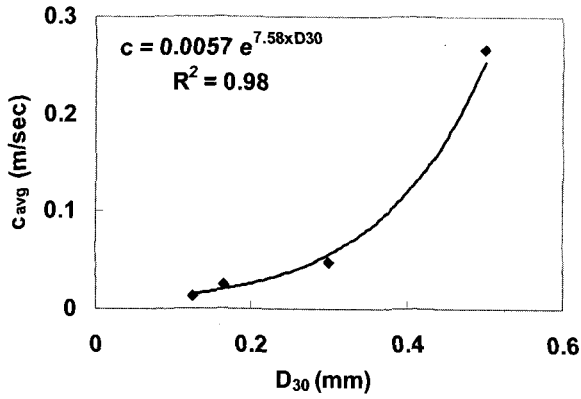


(a)  $b_{avg}$ 와  $D_{30}$ 의 상관관계

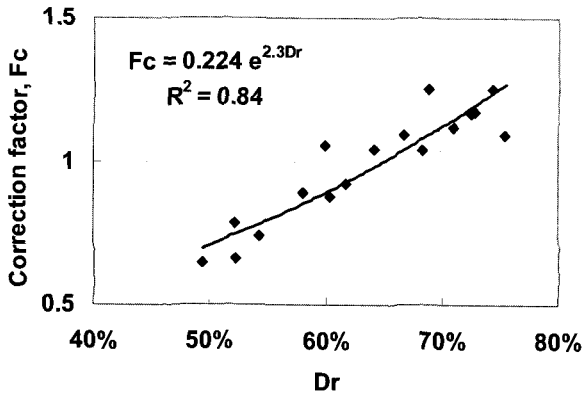


(b) 상대밀도에 대한 보정계수  $F_b$

그림 10. 변수 b의 산정곡선



(a)  $c_{avg}$ 와  $D_{30}$ 의 상관관계



(b) 상대밀도에 대한 보정계수  $F_c$

그림 11. 변수  $c$ 의 산정곡선

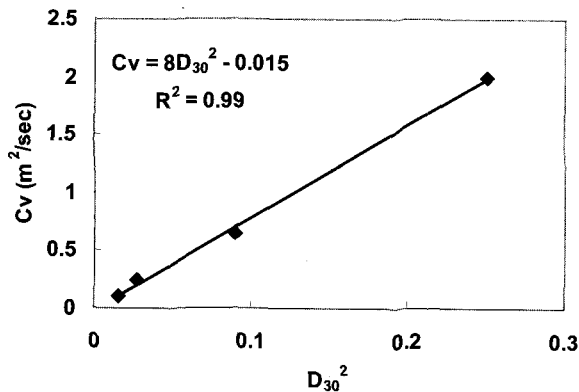


그림 12. 압밀계수  $c_v$ 의 산정그래프

라 상대밀도가 증가하지만 변수  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 값을 적절히 결정 해주면 상대밀도에 관계없이 동일한 압밀계수값을 적용하더라도 예측곡선과 실측곡선이 매우 잘 일치하는 것으로 나타났기 때문이다.

앞서 제시한 입력변수들의 산정방법을 정리하여 나타내면 다음과 같다.

① 변수  $a = a_{avg} \times F_a = 298.20 \times e^{-8.44D_{30} - 4.62D}$   
(sec/m,  $D_{30}$  in mm)

② 변수  $b = 0.25$  (1/m)

③ 변수  $c = c_{avg} \times F_c = 1.277 \times 10^{-3} \times e^{7.58D_{30} + 2.3D}$   
(m/sec,  $D_{30}$  in mm)

④ 압밀계수  $c_v = 8D_{30}^2 - 0.015$  ( $m^2/sec$ )

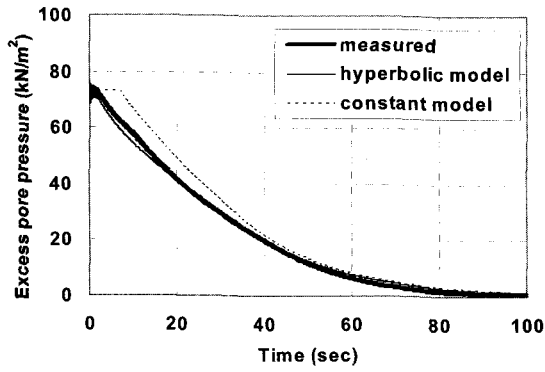
## 5. 소산모델의 검증

### 5.1 최적의 변수값을 이용한 예측결과

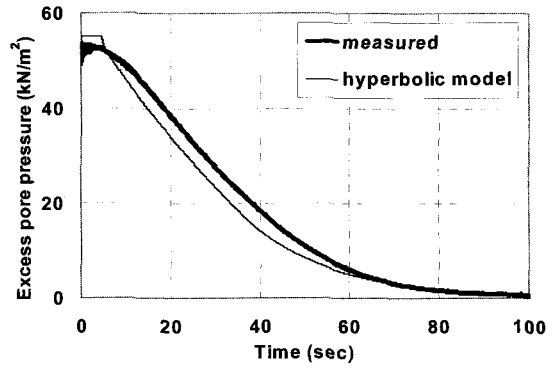
4.1절과 4.2절에서 소산곡선 실험결과를 최적으로 모사할 수 있는 변수값들을 결정하였는데 본 절에서는 이 변수 값들을 이용하여 소산곡선을 예측하여 보았다.

그림 13은 J-sand의 8m, 6m, 그리고 2m 깊이에서 과잉간극수압 소산 시간이력의 측정값과 예측값을 비교한 것이다. 이 그림에서 'constant 모델'은 견고층 두께 증가속도를 일정한 상수로 가정하였을 때의 소산곡선을 나타낸다. 본 해석에 이용된 입력값은  $a=0.44$  sec/m,  $b=0.29$  1/m,  $c=0.17$  m/sec,  $c_v=2m^2/sec$ ,  $\gamma=9.16$  kN/m<sup>3</sup> 이다. 소산모델을 이용하여 산정한 과잉간극수압 소산곡선은 8m와 6m에서 계측결과와 매우 잘 일치하였다. 그러나, 2m 깊이에서는 약간의 오차가 발생하였는데 이것은 압밀계수값을 전 깊이에 대하여 일정하게 가정하는 등의 한계 때문으로 판단된다. 'constant model'의 과잉간극수압 소산이 시작되는 시점의 과잉간극수압 값을 비교하면, 깊이 8m의 경우 측정값은 62.2kPa이고 'constant model'과 'hyperbolic model'의 예측값은 각각 73.3kPa과 58.9kPa이었다. 깊이 6m의 경우에는 측정값은 45.1kPa이고 'constant model'과 'hyperbolic model'의 예측값은 각각 54.9kPa과 44.5kPa이었다. 즉 측정값에 대한 과잉간극수압 예측값의 상대오차는 'constant model'은 18%~22%인데 비하여 'hyperbolic model'은 1%~5%이었다. 깊이 2m의 경우에는 두 모델의 견고화시점이 동일하게 입력되므로 예측값은 큰 차이가 없다. 그러므로, 액상화 층의 실제적인 소산거동을 모사하기 위해서는 견고층 두께의 비선형적인 변화를 고려하는 것이 바람직하다. I-sand, U-sand, N-sand의 경우에도 과잉간극수압 소산곡선의 예측값과 계측값을 비교해본 결과 지표면 근처에서는 약간의 오차가 발생하였지만 견고층 두께의 비선형적 변화를 고려한 모델이 계측값과 잘 일치하는 결과를 주었다.

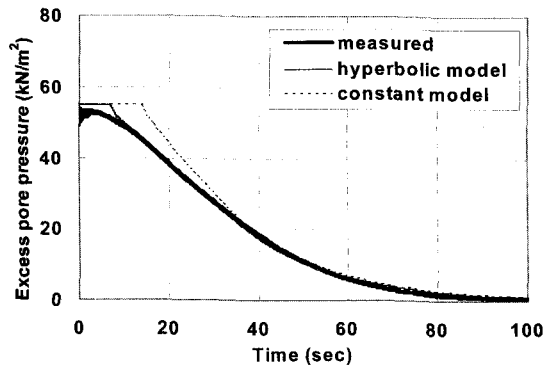




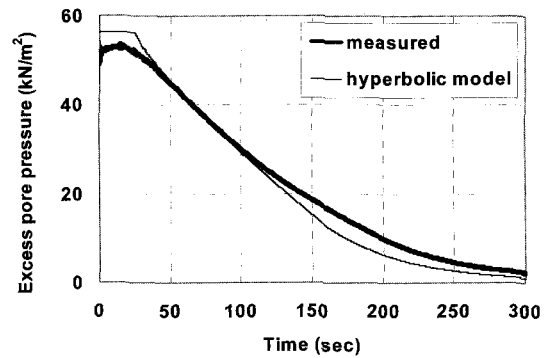
(a) 깊이 8.0m



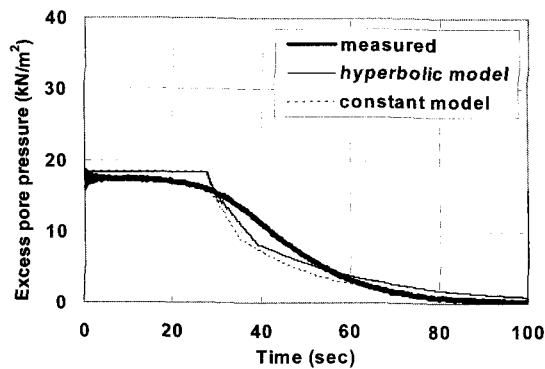
(a) J-sand



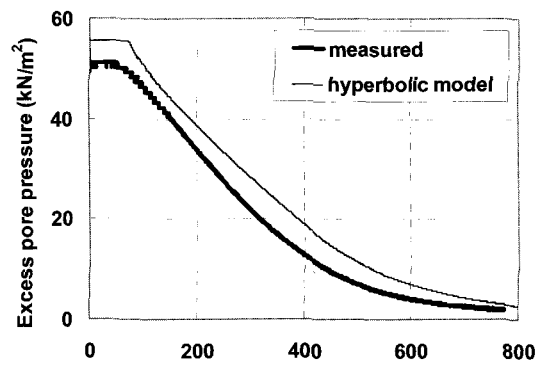
(b) 깊이 6.0m



(b) I-sand



(c) 깊이 2.0m

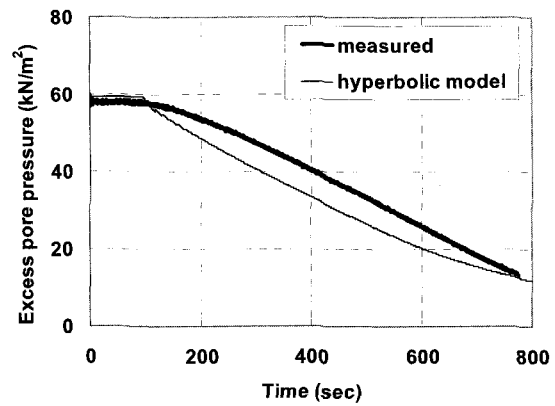


(c) U-sand

그림 13. 과잉간극수압 예측값과 측정값의 비교 (J-sand, 1번째 진동)

### 5.2 입력변수 산정식을 적용한 예측결과

표 4는 4.3절에서 제안된 입력변수 산정식들을 이용하여 얻어진 입력변수값들이다. 이 입력변수값들을 이용하여 각 모래의 첫 번째 진동에서의 과잉간극수압 소산거동을 예측하고 그 결과를 그림 14에 나타내었다. 입력변수 최적값을 적용할 때에 비하여 예측결과의 정확도가 약간 떨어졌지만 예측값은 측정값과 비교하여 소산시작시점, 전반적인 변화경향 그리고 소산완료 시점 등을 잘 묘사하는 것으로 나타났다. 그러므로, 본 결과는 개발된 소산모델과 입력 변수 산정식의 유효성을 보여준다.



(d) N-sand

그림 14. 과잉간극수압 예측곡선과 측정값의 비교(깊이 6.0m, 1번째 진동)

표 4. 소산모델 검증에 이용된 입력변수값 (1번째 진동)

	$C_v$ (m <sup>2</sup> /sec)	a (sec/m)	b (1/m)	c (m/sec)	$r^i$ (kN/m <sup>3</sup> )
J-sand	1.985	0.449	0.25	0.176	9.16
I-sand	0.705	2.126	0.25	0.041	9.38
U-sand	0.200	6.699	0.25	0.015	9.29
N-sand	0.110	8.449	0.25	0.011	9.92

## 5. 결론

본 연구에서는 수평 모래지반에 대한 원심모형실험 결과를 이용하여 액상화된 지반의 과잉간극수압 소산 예측 모델을 개발하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 견고층의 두께증가속도는 깊이가 깊은 곳에서는 빠르고 지표에 가까워질수록 느려지는 것으로 나타났다. 이러한 비선형적인 견고층 두께 증가속도를 예측하기 위해 hyperbolic 모델을 바탕으로 견고층 두께 예측모형을 제안하였다. 본 모델은 원심모형실험에서 얻어진 견고층 두께 증가속도를 잘 모사할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 원심모형실험 결과로부터 소산모델의 입력변수값들을 추정할 결과, 입력변수들은 흙의 입도특성값인  $D_{30}$  및 상대밀도와 큰 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이 상관관계를 이용하여 흙의  $D_{30}$  값과 상대밀도로부터 입력변수값을 산정하는 관계식을 제안하였다.
- 3) 비선형적인 견고층 두께 증가모델과 Scott의 모델을 결합하여 새로운 과잉간극수압 소산모델을 제안하였다. 개발된 소산모델과 입력변수 산정식을 이용하여 예측된 소산곡선은 원심모형실험에서 얻어진 과잉간극수압 소산 시간이력을 잘 모사하는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-003-D00389)과 2005학년도 동아대학교 학술연구비(신진과제)의 지원 하에 연구되었으며 이에 감사를 표합니다.

## 참고 문헌

1. 김성렬, Ko, Hon-Yim, 김명모(2006), "원심모형실험을 이용한 액상화 모래지반의 과잉간극수압 소산거동 분석", *한국지반공학학회 논문집*, Vol.22, No.1, pp.53-61.
2. 하익수, 김명모 (2003), "1-g 진동대시험을 이용한 진동하중을 받는 포화된 모래지반의 투수계수 변화 추정", *한국지반공학학회 논문집*, Vol.19, No.6, pp.363-369.
3. Florin, V.A. and Ivanov, P.L. (1961), "Liquefaction of Saturated Sandy Soils," *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 1, 1961, pp.107-111.
4. Gibson, R.E. (1958), "The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time," *Geotechnique*, 18, pp.171-182.
5. Kokusho, T. (1999), "Water Film Effect on Lateral Spreading of Liquefied Sand," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.10, pp.817-826.
6. Scott, R.F., (1986), "Solidification and Consolidation of A Liquefied Sand Column", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.4, pp.23-31.

(접수일자 2007. 2. 20, 심사완료일 2007. 7. 5)