

# UBC3D-PLM 모델을 이용한 1차원 유효응력해석에 의한 액상화 평가

김정회<sup>1</sup> · 진현식<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국가스기술공사 엔지니어링사업처 부장, <sup>2</sup>(주)HNG컨설턴트 지질및지반 연구부 대표

## Liquefaction Evaluation by One-Dimensional Effective Stress Analysis Using UBC3D-PLM Model

Jung-Hoe Kim<sup>1</sup> · Hyun-Sik Jin<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Director, Department of Engineering Business, Kogas-Tech

<sup>2</sup>President, Department of Geology and Geotechnical Research, HNG Consultants Co., Ltd.

### Abstract

This study compares the revised method in loose saturated sandy ground where the LNG storage tank will be installed with an evaluation method by one-dimensional effective stress analysis using the UBC3D-PLM model. Various laboratory and field tests were conducted to establish the parameters necessary for evaluation. The revised liquefaction evaluation method using the seismic response analysis result and N value from standard penetration testing evaluated the possibility of liquefaction as high, but assessment using effective stress analysis, which can consider various liquefaction resistance factors, found the site to be somewhat stable against liquefaction. One-dimensional finite element analysis using UBC3D-PLM modeling facilitated easier assessment of stability against liquefaction than the other methods and minimized the area required for reinforcement against liquefaction. In addition, it is expected that two-and three-dimensional numerical analysis considering the foundation of the LNG storage tank can identify the seismic design and behavior when liquefaction occurs.

**Keywords:** liquefaction, effective stress analysis, UBC3D-PLM model, excess pore water pressure, LNG storage tank

### OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Hyun-Sik Jin  
E-mail: hng@hng.re.kr

Received: 11 October, 2022

Revised: 9 January, 2023

Accepted: 13 February, 2023

© 2023 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 초 록

본 연구는 LNG저장탱크가 설치될 느슨한 포화사질지반을 대상으로 개정된 액상화 평가법과 UBC3D-PLM 모델을 이용한 1차원 유효응력해석에 의한 액상화 평가법을 비교한 것이다. 이를 위해 여러가지 실내 및 현장시험을 실시하여 필요한 Parameter를 산정하였다. 검토결과, 지진응답해석결과와 SPT N 값을 이용하는 개정 액상화 평가법은 액상화 발생 가능성을 높게 평가하였지만, 다양한 액상화 저항인자를 고려할 수 있는 유효응력해석법은 액상화에 다소 안정한 것으로 분석되었다. UBC3D-PLM 모델을 이용한 1차원 유효응력해석을 할 경우 보다 간편하게 액상화 안정성 검토가 가능하였고, 액상화 보강 영역을 최소화 할 수 있었다. 또한, LNG저장탱크의 기초를 고려한 2·3차원 수치해석 시에는 액상화 발생 시 내진설계 및 거동특성을 규명하는 것에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어:** 유효응력해석, 액상화, 과잉간극수압, UBC3D-PLM 모델, LNG저장탱크

## 서론

LNG(Liquefied Natural Gas)는 천연가스를  $-162^{\circ}\text{C}$  상태에서 냉각하여 액화시킨 뒤 부피를 1/600로 압축시킨 것이다. 이러한 LNG를 저장하는 시설이 LNG저장탱크(LNG Storage Tank)이다. LNG는 외국의 천연가스를 액체화시킨 뒤 LNG선으로 국내로 운반하기에 LNG저장탱크는 대부분 해안가에 위치하고 있다. 국내 해안가의 지반은 연약한 점토 및 느슨한 모래층의 출현빈도가 높아 LNG저장탱크 기초공법으로는 주로 강관말뚝이 많이 이용되고 있다. 또한 기초지반조건이 느슨한 모래층일 경우에는 반드시 액상화에 대한 안정성 검토가 필요하다. Fig. 1은 강관말뚝기초로 지지된 LNG저장탱크의 단면 및 평면도를 보여주고 있다.

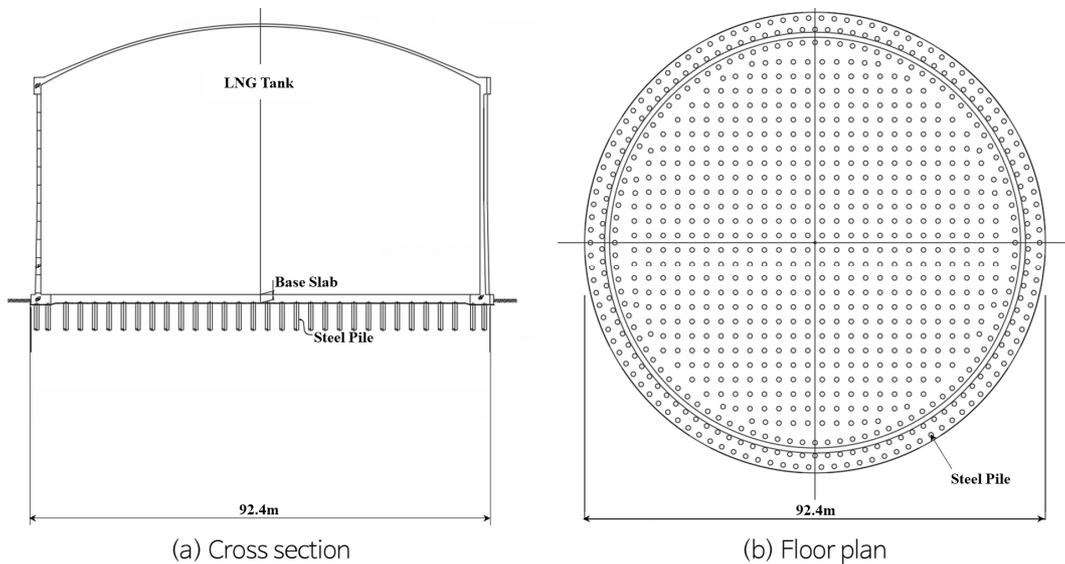


Fig. 1. LNG storage tank.

액상화는 느슨하고 포화된 사질토 지반에 지진 하중이 작용하였을 때, 지반 내 간극수압 증가에 따른 유효응력 감소로 지반의 강도를 잃는 현상이다. 이러한 액상화 현상은 지진 시 유발되는 대표적인 재난적 지반공학적 현상으로 사회적, 경제적으로 많은 피해를 유발할 수 있다. 액상화로 인한 대표적 피해사례는 1964년 일본 니이가타(Niigata)에서 발생한 아파트 기울어짐과 교량 상판의 붕괴사고, 1976년 중국 탕산에서의 건물 붕괴사고(24만 명의 주민 사망), 2011년 뉴질랜드 크라이스처치(Christchurch)에서의 지반침하사고 등이 있다. 한편 국내에서는 2017년 포항시에서 공원 및 논밭 등지에 액상화가 발생하였으나, 큰 피해는 없었다. 이와 같이 세계 곳곳에서 액상화로 인한 인명 및 재산상의 손실을 발생시키고 있으며, 이에 수 많은 지반공학자들을 중심으로 하여 액상화 피해저감을 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

이러한 액상화 현상 발생 가능성을 평가하기 위해, 2018년 한국지반공학회에서는 국가건설기준센터와 함께 국가건설기준 “내진설계일반(KDS 17 10 00)” 내 액상화 공통설계기준을 제정하였으며, 이를 반영하여 2020년 한국시설안전공단에서는 “기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가 요령(안)” 내 액상화 평가를 개정한 바 있다. 기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가 요령(안)(KISTEC, 2020)에 따르면 액상화 평가는 예비평가와 본 평가 2단계로 구분되어져 있다. 액상화 예비평가는 지반조건(지하수위, 입도, 심도 등)을 고려하여 액상화 평가 생략여부를 결정하고, 액상화 본평가는 지반응답해석과 N값을 이용하여 액상화 발생 가능성을 평가하는 것이다. 하지만, 액상화 발생 영향인자는 N값, 과잉간극수압, 간극수압, 연직유효응력, 지반의 투수계수 및 지반의 전단강도(점착력 및 내부마찰각) 등이 있으나, 국내기준에는 이러한 것들

을 고려할 수 없다는 것이다. Park(2008)과 Park and Kwak(2009)에 따르면 지진응답해석과 N값을 이용한 액상화 평가방법은 액상화 발생 가능성을 과대평가하는 경향이 있으며, 보다 “합리적인 판단을 위해서는 유효응력해석이 필요하다”라고 제안하였다.

따라서, 본 연구는 2020년 개정된 액상화 예비평가 및 본 평가 결과(지진응답해석과 N값을 이용)와 유효응력해석에 의한 액상화 평가결과를 비교하고자 한다. 유효응력해석법에 의한 액상화 평가 시에는 지층모델링은 1차원으로 하였고, 예비평가 및 본평가를 통해 확인된 액상화 발생 가능성이 있는 지층에는 UBC3D-PLM 모델을 적용하였다. 특히 UBC3D-PLM 모델이 적용된 지층은 1 m 간격으로, SPT조사 간격과 같게 모델링 함으로써 가급적으로 동일한 조건에서 이 둘을 비교하였다.

## 관련연구동향

유효응력해석에 의한 액상화 평가를 해야할 경우, 액상화 발생 시 지반의 응력-변형률 거동 및 과잉간극수압을 정확히 예측할 수 있는 신뢰성 높은 지반해석 모델의 선정이 매우 중요하다. 이렇게 액상화 평가에 이용 가능한 지반해석모델은 Iai 모델(Iai et al., 1990), Finn 모델(Byrne, 1991), PM4Sand 모델(Boulanger and Ziotopoulou, 2015), UBCSand 및 UBC3D-PLM 모델(Beaty and Byrne, 2011) 등이 있다. 여기서 UBCSand 모델은 2차원 모델이며, UBC3D-PLM 모델은 2차원 및 3차원 적용이 가능한 모델이다.

유효응력해석에 의한 액상화 평가 관련연구는 국내외에서 다방면으로 이루어져왔다. Park(2008)은 유효응력해석과 등가선형해석을 이용하여 액상화 평가 연구를 수행하여 등가선형해석은 지반의 전단응력을 과대평가하여 유효응력해석보다 액상화가 일어나기 쉬운 것으로 예측되었다. 또한 Park and Kwak(2009)은 간편예측법은 액상화 발생 가능성을 과대평가하는 경향이 있으며 반드시 정확한 판단을 위해서는 유효응력해석이 필요하다라고 제안하였다. 그리고 Daftari(2015), Tran et al.(2017) 및 Tung et al.(2020)에 의하면 Finn 모델은 액상화 후 발생하는 과잉간극수압을 예측할 수 없다고 평가하였다. Park and Kim(2022)은 California Imperial Valley의 Wildlife Site에서 1987년 11월 지진이 발생하였고, 이때 실측된 값(가속도와 간극수압)과 Finn 모델과 UBC3D-PLM 모델을 이용한 유효응력해석결과와 비교하였다. 그 결과 Finn 모델보다 UBC3D-PLM 모델에 의한 해석결과가 실측값과 유사한 과잉간극수압 거동을 예측하였고, 실측과 동일하게 액상화 발생여부를 평가할 수 있는 것을 확인하였다. 이외에도 액상화 발생 시 케이슨 안벽 거동 평가(Lee and Noh, 2016; Lee et al., 2018; Kim et al., 2019)에 유효응력해석법이 많이 사용되고 있다.

액상화 평가방법은 2010년 이전에는 주로 등가선형해석 및 간편예측법(액상화 본 평가)이 많이 사용되었으나, 2010년 이후에는 유효응력해석법의 사용이 점점 많아지고 있었다. 이는 등가선형해석 및 간편예측법은 액상화 발생 가능성을 과대평가하기 때문이다. 또한 유효응력해석에 필요한 지반해석 모델은 여러 가지 액상화 저항인자를 고려할 수 있고, 2·3차원 모델링이 가능하며, 액상화 발생 후 과잉간극수압을 예측할 수 있는 UBC3D-PLM 모델이 가장 적합한 모델로 분석되었다.

## 예비평가 및 본 평가를 통한 액상화 발생 가능성 지층 평가

### 연구대상위치 및 지층특성분석

Fig. 2는 본 연구대상지의 시추위치와 시추주상도를 보여주고 있다. Fig. 2에서 LNG기초지반을 형성하기 위해 인공적인 매립이 이루어졌음을 알 수 있고, 좌측 및 우측 LNG 기초지반의 지층구조와 공학적 특성을 파악하기 위하여 10개의

시추조사와 다양한 실내 및 현장시험이 실시되었다. 10개의 시추조사를 통해 확인된 지층구조는 매립층(자갈/모래), 풍화토, 풍화암, 연암 및 보통암 순으로 분포하고 있으며, 매립층(자갈/모래)는 대부분 느슨한 층( $N < 25$ )으로 확인되었다.

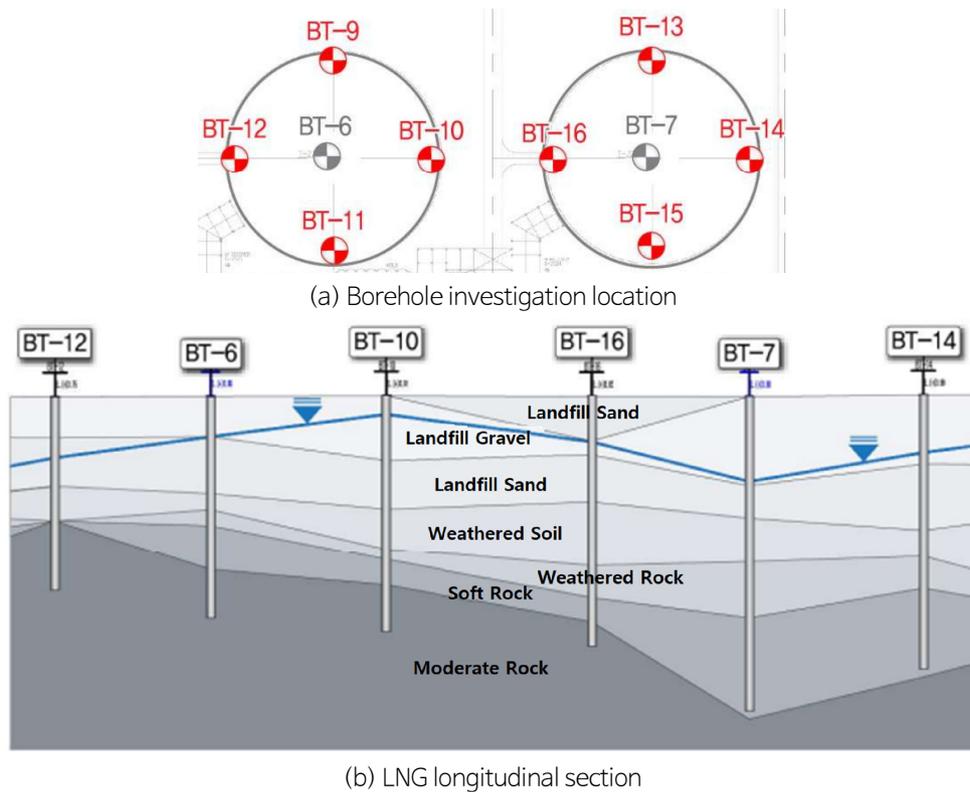


Fig. 2. Geological characteristics by borehole investigation.

### 액상화 예비평가를 통한 액상화 가능성 평가

액상화 예비평가는 지반 조건을 고려하여 액상화 평가 생략여부를 결정하는 것이다. 즉, 지하수위, 심도, 상대밀도,  $(N_1)_{60}$ , 세립토함유량 및 입도분포으로 평가하는 것이다. 액상화 예비평가 해설(KISTEC, 2020)의 각 항목에 해당하는 경우에는 “액상화에 대해 안전한 것으로 보고 액상화 평가를 생략한다”라고 제시되어 있다. 본 연구에는 이를 참조하여 액상화 예비평가를 실시하였고, 예비평가 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Liquefaction preliminary evaluation result

Borehole	Depth of liquefaction (GL(-)m)	$(N_1)_{60}$	Fine contents (%)	Particle size distribution	Stable or unstable
BT-6	Landfill, 5.0~10.0	4/30~15/30	43.2~48.8	-	Stable
BT-9	Landfill, 11.0~12.0	13/30~16/30	47.4~50.5	-	Stable
BT-10	Landfill, 3.0~8.0	8/30~17/12	18.6	Liquefiable soil (A)	Unstable
BT-11	Landfill, 7.0~11.0	11/30~22/30	42.5	-	Stable
BT-12	Landfill, 8.0~12.0	3/30~14/30	45.1	-	Stable
BT-7	Landfill, 8.0~10.0	14/30~15/30	3.2	Non liquefiable soil (C)	Stable
	Landfill, 18.0~19.0	17/30~21/30	30.8	Liquefiable soil (A)	Unstable

Table 1. Continued

Borehole	Depth of liquefaction (GL(-)m)	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	Fine contents (%)	Particle size distribution	Stable or unstable
BT-13	Landfill, 11.0~14.0	8/30~17/30	10.8~31.6	Liquefiable soil (A)	Unstable
BT-14	Landfill, 8.0	23/30	3.2	Liquefiable soil (A)	Unstable
BT-15	Weathered soil, 10~13	7/30~17/30	28.7	Liquefiable soil (A)	Unstable
	Weathered soil, 14~17	13/30~24/30			
BT-16	Landfill, 6.0~13.0	15/30~22/30	3.2~31.6	Liquefiable soil (A)	Unstable

(N<sub>1</sub>)<sub>60</sub> = C<sub>N</sub> × N<sub>60</sub>

where, C<sub>N</sub>: Overburden correction factor; N<sub>60</sub>: Corrected SPT blow counts to account for the characteristics of the test.

### 액상화 본 평가를 통한 액상화 가능성 평가

액상화 예비평가결과 6개의 시추공에서 액상화 발생 가능성이 있는 것으로 평가되어, 액상화 본 평가가 필요한 것으로 검토되었다. 액상화 본 평가에서 액상화 발생 가능성은 대상 현장에서 액상화를 유발시키는 액상화 저항전단응력비(CRR<sub>7.5</sub>)를 지진에 의해 발생하는 진동전단응력비(CSR)로 나눈 안전율로 평가하며, 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$FS_{(M=6.5)} = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \times MSF > 1.0 \tag{1}$$

여기서, CRR<sub>7.5</sub> : 지진규모 7.5에 해당하는 액상화 저항전단응력비

CSR : 진동전단응력비

MSF : 지진규모 보정계수(국내 지진규모 보정계수 = 1.5)

FS<sub>(M=6.5)</sub> : 본 평가에 의한 액상화 안전율

본 연구에서는 지진구역계수(I구역), 평균재현주기(4,800년), 위험도계수(2.6) 및 지반의 분류(S<sub>4</sub>)을 고려하여 국내내진설계기준(KCSC, 2018)이 반영된 SeismoArtif 2020 프로그램으로 인공지진파를 추출하였다. 추출된 인공지진파를 ProShake 2.0 프로그램을 이용하여 지진응답해석을 수행하였고, 지진응답해석을 통해 지층별 최대전단응력을 산정하였다.

산정된 지층별 최대전단응력, 현장조사 시 평가된 지층별 SPT N값, 그리고 상재하중, 에너지 효율 및 세립분 함유량이 보정된 (N<sub>1</sub>)<sub>60cs</sub> 을 이용하여 액상화 본 평가를 수행하였고, 그 결과 3개의 시추공(BT-10, BT-15 및 BT-16)에서 액상화 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다(Table 2 참조).

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \tag{2}$$

여기서, (N<sub>1</sub>)<sub>60</sub> : 상재하중과 에너지효율(60%)이 보정된 N값

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} + \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right)$$

FC : 세립토 함유량(%), 200번체 통과율

Table 2. Liquefaction main evaluation result

Borehole	Depth (GL(-)m)	CRR <sub>7.5</sub>	CRR	FS (M=6.5)	Safe factor	Stable or unstable
BT-10	3.0	0.122	0.314	0.580	1.0	Unstable
	4.0	0.103	0.344	0.449		Unstable
	5.0	0.103	0.352	0.439		Unstable
	6.0	0.112	0.339	0.495		Unstable
	7.0	0.163	0.319	0.766		Unstable
	8.0	0.199	0.292	1.021		Stable
BT-7	18.0	0.313	0.178	2.637	1.0	Stable
	19.0	0.240	0.184	1.974		Stable
BT-13	11.0	0.099	0.133	1.116	1.0	Stable
	12.0	0.155	0.136	1.714		Stable
	13.0	0.179	0.140	1.920		Stable
	14.0	0.205	0.144	2.136		Stable
BT-14	8.0	0.257	0.183	2.103	1.0	Stable
BT-15	10.0	0.205	0.268	1.150	1.0	Stable
	11.0	0.134	0.269	0.747		Unstable
	12.0	0.096	0.271	0.531		Unstable
	13.0	0.124	0.272	0.685		Unstable
	14.0	0.155	0.268	0.869		Unstable
	15.0	0.205	0.265	1.161		Stable
	16.0	0.333	0.265	1.884		Stable
17.0	0.373	0.265	2.113	Stable		
BT-16	6.0	0.192	0.273	1.054	1.0	Stable
	8.0	0.170	0.273	0.937		Unstable
	9.0	0.170	0.278	0.917		Unstable
	10.0	0.192	0.286	1.008		Stable
	11.0	0.160	0.292	0.824		Unstable
	12.0	0.242	0.295	1.230		Stable
	13.0	0.170	0.297	0.860		Unstable

## 유효응력해석을 위한 지반모델

LNG Tank가 설치될 지반 상에서의 10개 시추공에 대해 액상화 예비평가 및 본 평가를 수행한 결과, 3개의 시추공(BT-10, BT-15, BT-16)에서 액상화 발생 가능성이 예측되었다. 이에 보다 더 신뢰성 있고 상세한 액상화 발생 가능성을 예측하기 위해 유효응력해석을 통한 액상화 평가를 수행하였다. 이에 대표적인 지반모델로는 Flac의 Finn 모델과 Plaxis의 UBC3D-PLM 모델이 있으나, Daftari(2015), Tung et al.(2020) 및 Park and Kim(2022)은 액상화 후 발생하는 과잉간극수압을 예측할 수 있는 UBC3D-PLM 모델이 액상화 평가에 더 부합한 모델이라고 언급하였다. 따라서 본 연구에서 이용된 프로그램은 UBC3D-PLM 모델이 내장된 Plaxis2D를 선정하였고, 액상화를 평가하고자 하는 지층의 지반모델은 UBC3D-PLM 모델을, 연암의 지반모델은 Linear Elastic 모델을, 그 이외의 지층에는 HS Small Strain 모델을 적용하였다.

## UBC3D-PLM 모델

본 연구에서 액상화해석에 이용된 지반모델은 UBC3D-PLM 모델이다. 최초 Puebla et al.(1997)이 제안한 모델은 2차원 모델(UBCSAND)이었다. 그리고 Beaty and Byrne(1998, 2011)는 다양한 프로그램에 이를 적용하여 모델을 검증하였다. UBC3D-PLM 모델은 UBCSAND 모델을 3차원 모델화한 것이다. 초기 UBC3D-PLM 모델은 Tsegaye(2010)에 의해 개발되고 발표된 후, 유한요소 프로그램 Plaxis2D에서 User-defined Soil model로 적용되었고, 최근에는 정식모델로 이용되고 있다. Plaxis2D내에서 UBC3D-PLM 모델 Parameter는 표준관입시험( $(N_1)_{60}$ ) 결과를 이용하여 산정할 수 있으며 (Bentley Systems International Ltd., 2021), 이는 아래와 같다.

### ① Stiffness parameter

$$k_G^e = 21.7 \times 20.0 \times ((N_1)_{60})^{0.333} \quad (3)$$

$$k_B^e = k_G^e \times 0.7 \quad (4)$$

$$k_G^p = k_G^e \times ((N_1)_{60})^2 \times 0.003 + 100.0 \quad (5)$$

여기서,  $k_G^e$  : 탄성전단계수

$k_B^e$  : 체적전단계수

$k_G^p$  : 소성전단계수

### ② Strength parameter

$$\phi_p = \phi_{pi} + \max\left(0.0, \frac{(N_1)_{60} - 15}{5}\right) \quad (6)$$

$$\phi_{pi} = \phi_{cv} + \frac{(N_1)_{60}}{10} \quad (7)$$

$$R_f = 1.1 \times ((N_1)_{60})^{-0.15} < 0.99 \quad (8)$$

여기서,  $\phi_{cv}$  : 내부마찰각

$\phi_p$  : 최대 내부마찰각

$\phi_{pi}$  :  $(N_1)_{60}$  이 보정된 내부마찰각

$R_f$  : 파괴비(일반적으로 0.9)

### ③ Advanced parameter

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N_{60} \quad (9)$$

여기서,  $f_{dens}$  : 조밀화 요소(1.0)

$f_{Epost}$  : 액상화 후 요소(1.0)

### HS Small 모델

Plaxis2D내에서 HS Small 모델은 변형경화모델, 즉 HS 모델(Hardening Soil model)에 미소변형률 강성이 고려된 확장모델이다. HS 모델의 기본이론은 다음과 같이 축변형률  $\varepsilon_1$ 과 축차응력  $q$ 의 쌍곡선 관계를 이용하는 것이다.

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} \quad (10)$$

여기서,  $q_a$  : 수렴축차응력

하중증가(loading)에 따른  $E_{50}$ 은 구속응력에 의존하는 탄성계수이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cot \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (11)$$

여기서,  $E_{50}^{ref}$  : 하중증가 시 기준구속압( $p^{ref}$ )에 상응하는 기준 탄성계수

$m$  : 구속압에 대한 멱승계수(사질토  $m = 0.5$ , 점성토  $m = 1.0$ )

그리고 재하중(reloading) 또는 제하중(unloading)시 필요한 탄성계수  $E_{ur}$ 는 식 (12)로 표현할 수 있으며, 일반적으로  $E_{ur}^{ref} \approx 3E_{50}^{ref}$  값을 사용기도 한다.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cot \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (12)$$

여기서,  $E_{ur}^{ref}$  : 재하 또는 제하 시 기준구속압( $p^{ref}$ )에 상응하는 기준 탄성계수

극한 축차응력( $q_f$ )과 수렴 축차응력( $q_a$ )는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$q_f = (c \cos \phi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}, \quad q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (13)$$

여기서,  $R_f$  : 파괴비(일반적으로 0.9으로 가정)

HS Small 모델에서는 미소변형률 강성을 고려하기 위한 입력변수를 2개로 단순화 시킨다. 일반적으로 최대 전단탄성 계수는 매우 낮은 변형률( $<10^{-5}$ )에서 발생한다. 이러한 미소변형률 전단강성은 전단변형률 증가와 함께 전단탄성계수는 급격하게 감소하게 되며, 이러한 변형률 증가에 따른 전단강성변화를 고려하기 위하여 식 (14)를 이용하여 전단변형률에 의존하는 비선형 전단탄성계수를 고려할 수 있다. Fig. 3은 전단변형률에 따른 비선형 전단탄성계수를 보여주고 있다.

$$G = \frac{G_o}{1 + 0.385 \gamma / \gamma_{0.7}} \tag{14}$$

여기서,  $G_o$  : 최대전단탄성계수

$\gamma_{0.7}$  :  $G = 0.7 G_o$ 에 해당되는 전단변형률

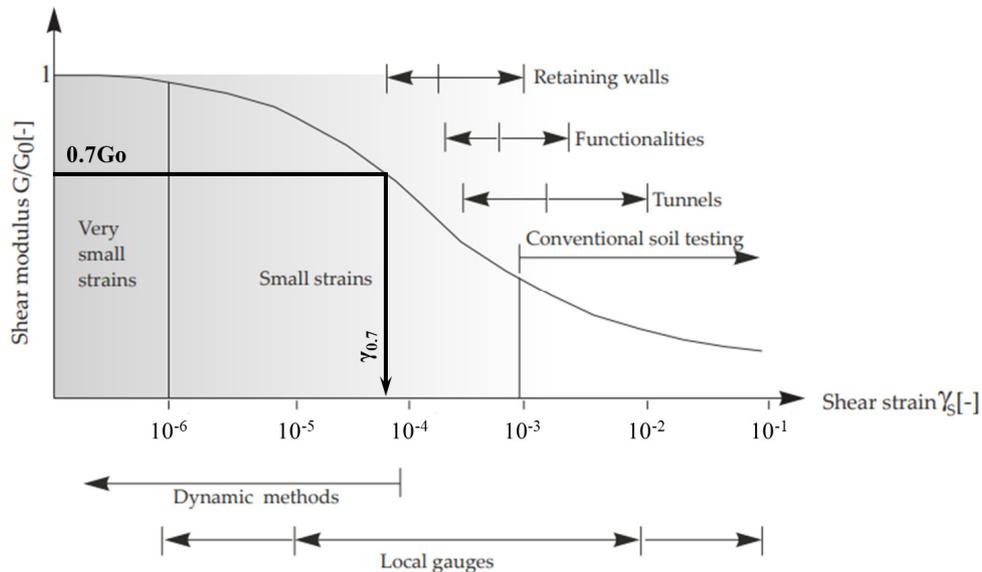


Fig. 3. Relationship between shear modulus and shear strain (Atkinson and Sallfors, 1991).

## 유효응력해석을 통한 액상화 평가

### 1차원 유한요소망 및 경계조건

10개의 시추공에 대해 액상화 예비평가, 액상화 본 평가를 수행한 결과 BT-10, BT-15, BT-16 시추공 일부 지층에서 액상화 발생 가능성이 예측되었고, 이에 보다 더 신뢰성 있고 상세한 액상화 발생 가능성을 예측하기 위해 유효응력해석을 통한 액상화 평가를 수행하였다.

Fig. 4는 BT-10, BT-15 및 BT-16 시추주상도별 1차원 유한요소망을 보여주고 있다. 액상화 예비평가 및 본평가를 통해 액상화 발생 가능성이 있는 지층은 1 m간격으로 모델링 하였으며, 최하단 연암층도 1 m로 모델링하였다. 유한요소해석단계는 초기응력설정, 지진하중적용으로 총 2단계로 설정하였다. 해석단계별 변위 및 동적경계는 Table 3에 나타내었다. 특히 지진하중 적용 시 좌우측면의 변위경계는 Free로 동적경계는 Tied Degrees of Freedom을 적용함으로써 1차원 유효응력 액상화모델링이 가능하도록 설정하였다.

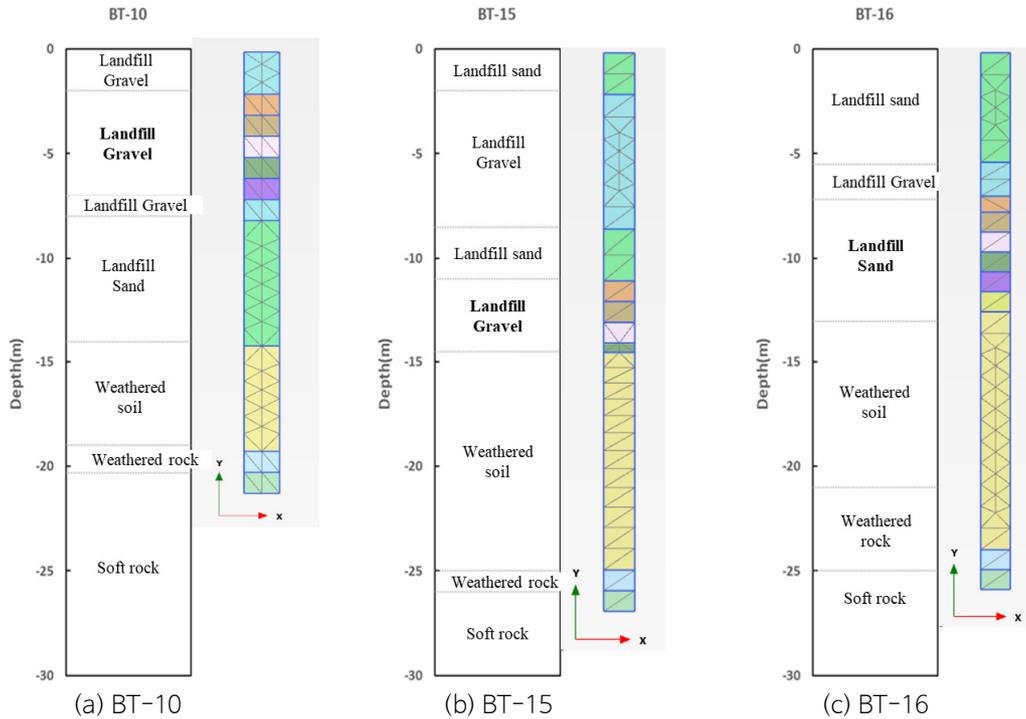


Fig. 4. Evaluation depth of liquefaction by borehole and one dimensional finite element.

Table 3. Displacement and dynamic boundary conditions for each analysis step

Stage name	Displacement boundary		Dynamic boundary	
	Left and right side	Bottom	Left and right side	Bottom
Initial phase	Horizontal fix	Vertical fix	-	-
Seismic phase	Free	Vertical fix	Tied degrees of freedom	Compliant base

본 연구에서는 지진구역계수(1구역), 평균재현주기(4,800년), 지반의 분류(S<sub>4</sub>) 등을 고려하여 국내내진설계기준(KCSC, 2018)이 반영된 SeismoArtif 2020 프로그램을 이용하여 인공지진파를 추출하였다(Fig. 5 참조).

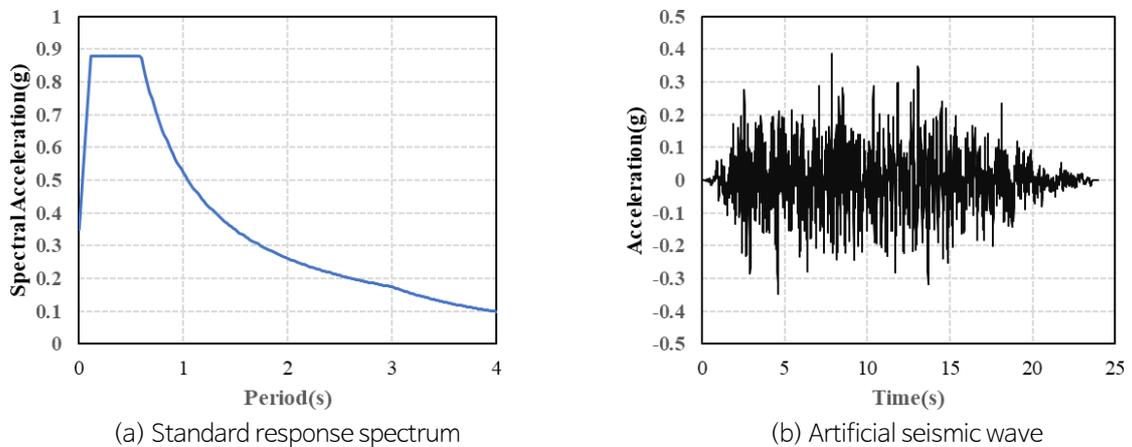


Fig. 5. Standard response spectrum and artificial seismic wave used for liquefaction evaluation.

**지층별 지반모델별 해석 Parameter**

Tables 4~6은 본 연구에서 적용된 지반모델별 해석 Parameter를 보여주고 있다. 대부분의 Parameter는 현장 및 실내 시험을 통해 산정하였으나,  $me$ ,  $ne$ ,  $np$ ,  $f_{dens}$ ,  $f_{Epost}$ ,  $R_f$  값은 프로그램에 내장된 기본값(Default Value)을 적용하였다. 그리고 투수계수는 문헌값에 제시된 값을 이용하였고, 매립자갈은 1.0 cm/s를, 매립모래는 0.01 cm/s를 적용하였다.

**Table 4.** UBC3D-PLM model parameter

Borehole	BT-10					BT-15				BT-16					
Depth (m)	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	11.0	12.0	13.0	14.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0
$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0
$k_G^e$	934	873	849	904	1,041	968	838	923	1,013	1,101	1,089	1,136	1,067	1,218	1,088
$k_B^e$	654	611	594	633	729	678	586	646	709	770	762	795	747	853	762
$k_G^p$	380	274	244	323	699	460	230	357	595	986	924	1,202	811	1,904	918
$me$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$ne$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$np$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$\phi_{cv}$	40	40	40	40	40	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
$\phi_p$	41	41	41	41	41	27.1	27.1	27.1	27.1	27.9	27.8	28.4	27.5	29.7	27.8
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	0	0	0	0	0	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
$\sigma_t$ (kN/m <sup>2</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$f_{dens}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$f_{Epost}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$P_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$R_f$	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
$(N_1)_{60}$	10	8	8	9	14	11	7	10	13	16	16	18	15	22	16
$k$ (cm/s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

**Table 5.** HS Small model parameter

	Unit	Gravel	Sand	Weathered soil	Weathered rock
$\gamma_t$	(kN/m <sup>3</sup> )	18.5	17.0	18.0	19.6
$E_{50}^{ref}$	(kN/m <sup>2</sup> )	7,247.8	6,952.6	6,892.3	37,741.2
$E_{oed}^{ref}$	(kN/m <sup>2</sup> )	7,247.8	6,952.6	6,892.3	37,741.2
$E_{ur}^{ref}$	(kN/m <sup>2</sup> )	21,743.4	20,857.8	20,676.9	113,223.6
$m$	-	0.5	0.5	0.5	0.5
$c$	(kN/m <sup>2</sup> )	0	14	10	30

Table 5. Continued

	Unit	Gravel	Sand	Weathered soil	Weathered rock
$c$	(kN/m <sup>2</sup> )	0	14	10	30
$\phi$	(°)	40	26	26	30
$\gamma_{0.7}$	-	0.0002	0.0002	0.00014	0.00014
$G_o^{ref}$	(kN/m <sup>2</sup> )	75,433.2	177,451.6	339,266.1	896,884.8
$\nu'_{ur}$	-	0.2	0.2	0.2	0.2
$p_{ref}$	(kN/m <sup>2</sup> )	100	100	100	100

Table 6. Linear elastic model parameter for soft rock

Rock type	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
Soft rock	24.0	500,000	0.27

### 수치해석 결과 분석

Fig. 6은 BT-10, BT-15 및 BT-16 시추공 내 액상화 발생 가능성이 있는 지층에서의 지진하중으로 인해 발생한 과잉간극수압을 보여주고 있다. 지진하중으로 인한 과잉간극수압의 증가량은 BT-10 > BT-15 > BT-16 시추공 순으로 나타나고 있으며, 과잉간극수압의 증가량이 큰 BT-10 시추공이 액상화에 가장 취약한 것으로 평가할 수 있다.

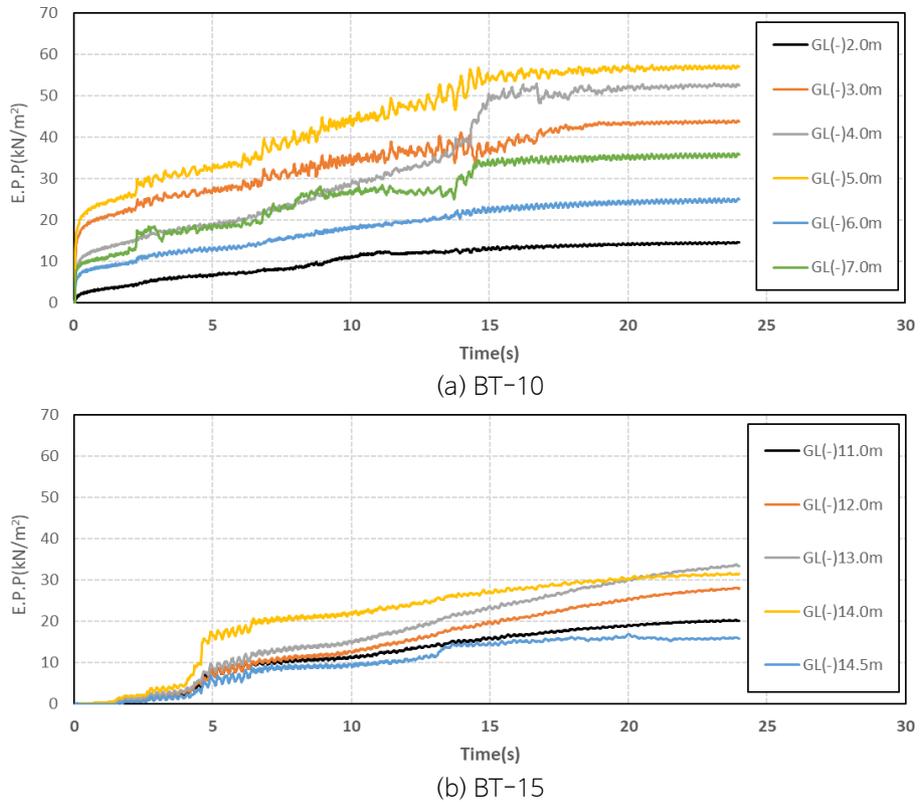


Fig. 6. Characteristics of time-excess pore pressure during earthquakes.

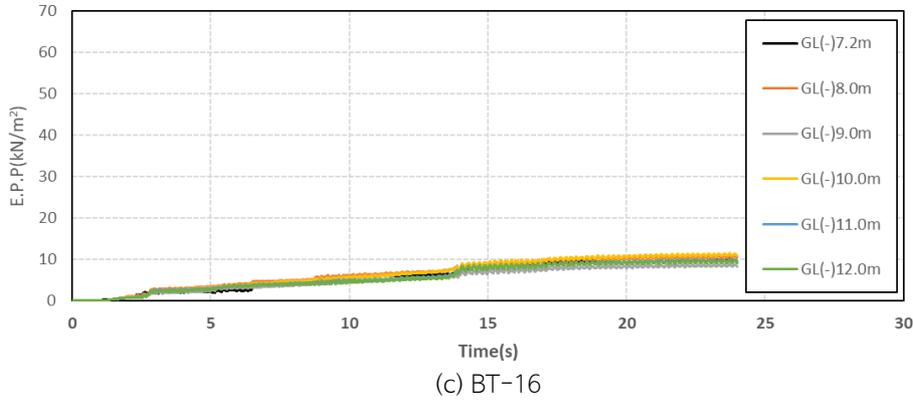


Fig. 6. Continued.

Fig. 7은 지진발생시 심도-과잉간극수압을 보여주고 있다. BT-10 시추공에서의 지진하중으로 인한 과잉간극수압 증가량(69.13 kN/m<sup>2</sup>)이 가장 크게 나고 있으며, BT-15 시추공에서 과잉간극수압 증가량은 61.66 kN/m<sup>2</sup>이며, BT-16 시추공에서 과잉간극수압 증가량(17.01 kN/m<sup>2</sup>)이 가장 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 BT-10( $N_{ave} = 9.8$ )의 N값이 BT-15( $N_{ave} = 10.2$ ) 및 BT-16( $N_{ave} = 17.2$ )에 비해 작으며, 액상화 발생 가능성 지층(매립자갈)의 심도가 낮고, 지하수위가 높아(GL(-)2.0 m) 상대적으로 과잉간극수압이 크게 나타나고 있는 것으로 판단된다. 또한, BT-16에서의 과잉간극수압 증가량이 매우 작은 이유는 N값이 상대적으로 매우 크기 때문이다.

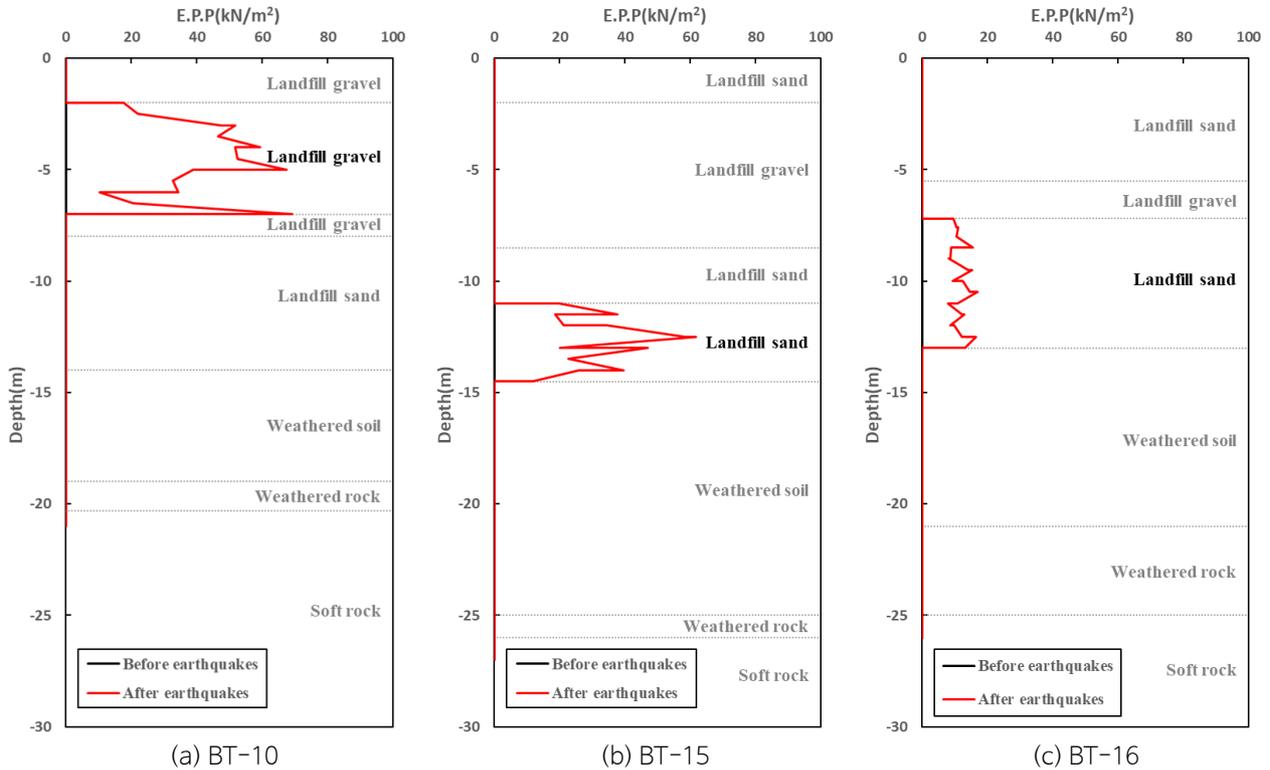


Fig. 7. Characteristics of depth-excess pore pressure during earthquakes.

Fig. 8은 지진발생시 심도-간극수압을 보여주고 있다. 여기서 간극수압이라 함은 “정수압+지진발생시 과잉간극수압”을 의미한다. BT-10 시추공에서의 과잉간극수압 증가량(69.13 kN/m<sup>2</sup>)으로 인해 간극수압 증가량이 매우 크게 나타나고 있다. BT-15 시추공에서의 과잉간극수압의 증가량(61.66 kN/m<sup>2</sup>)은 BT-10 시추공과 비슷하나, 심도가 깊어 간극수압 증가량은 BT-10보다 작음을 알 수 있다. BT-16에서의 간극수압 증가량은 가장 작음을 알 수 있다.

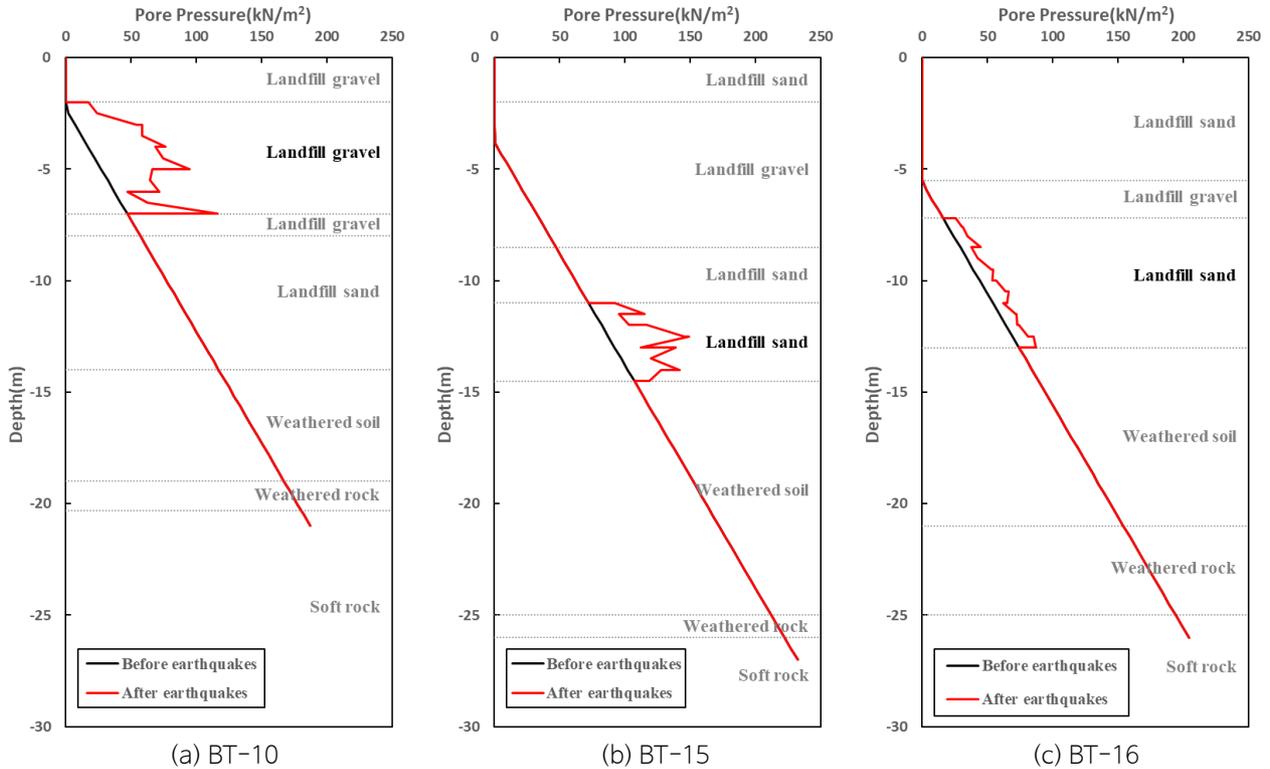


Fig. 8. Characteristics of depth-pore pressure during earthquakes.

Fig. 9는 심도-연직유효응력 관계도를 보여주고 있다. 지진하중 발생 전에는 심도가 깊어짐에 따라 연직유효응력은 증가하고 있었지만, 지진하중 발생 후에는 증가된 과잉간극수압으로 인해 액상화 발생 가능성 지층에서 연직유효응력이 감소하고 있었다. BT-15 및 BT-16에서는 지진하중 발생 후에도 연직유효응력이 (+)으로 유지하고 있으나, BT-10에서의 연직유효응력은 거의 0에 가깝거나, 일부에는 (-)으로 나타나고 있다. BT-10은 액상화 발생 가능성이 매우 높은 지층으로 추정할 수 있다.

Fig. 10은 심도-간극수압비(Ru) 관계도를 보여주고 있다. 여기서 간극수압비 = 과잉간극수압/연직유효응력을 말한다. 간극수압비(Ru)가 0.95 이상될 경우에는 액상화 발생 지층으로 판단할 수 있다. 시추공 BT-15 및 BT-16에서 최대 간극수압비는 0.46, 0.13으로 나타나 액상화에 안정한 지층으로 판단할 수 있으며, N값이 가장 큰 BT-16(N<sub>ave</sub> = 17.2)가 액상화에 매우 안정한 것으로 나타났다. 하지만, 시추공 BT-10에서 최대 간극수압비(Ru)는 1.06으로 나타나 액상화에 불안정한 것으로 나타나 액상화 대책공법이 필요한 것으로 평가되었다.

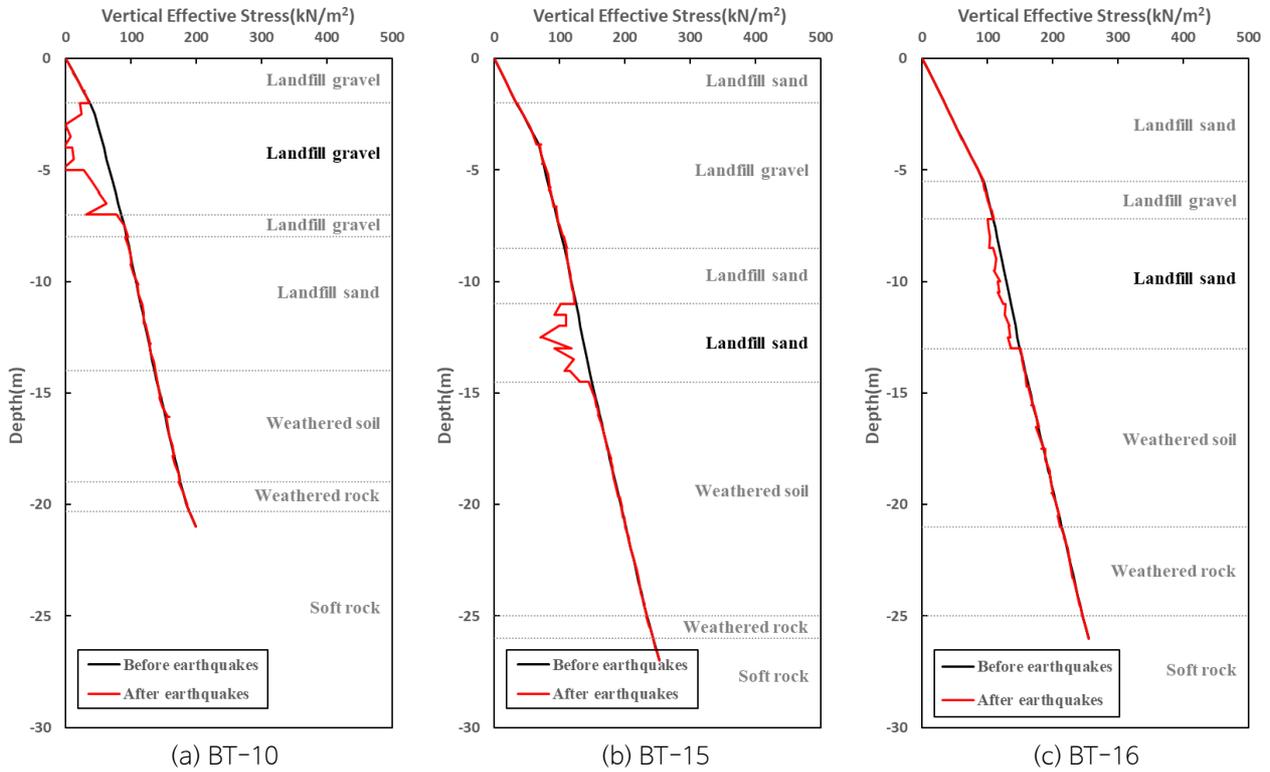


Fig. 9. Characteristics of depth-Effective vertical stress during earthquakes.

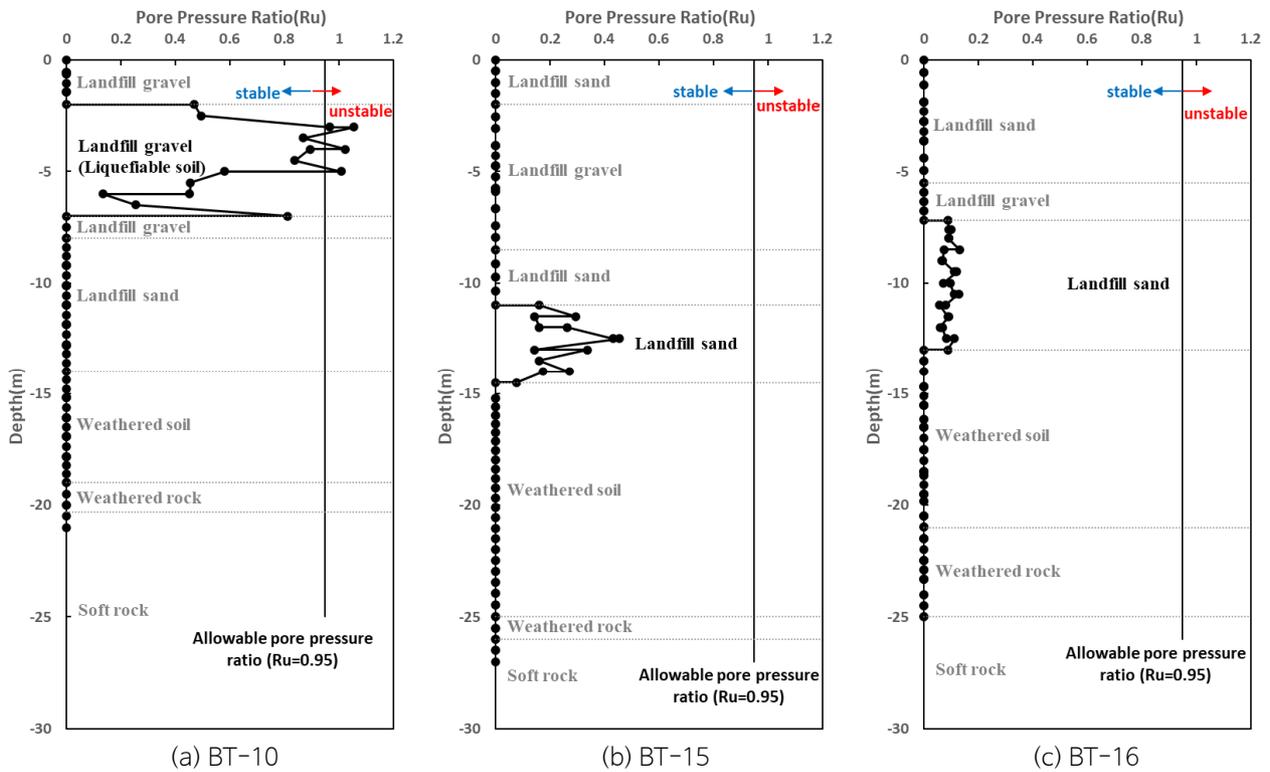


Fig. 10. Characteristics of depth-pore pressure ratio during earthquakes.

## 결론

본 연구에서는 개정된 액상화 평가법(KISTEC, 2020)과 UBC3D-PLM 모델이 적용된 유효응력해석법을 이용해 지진 발생시 액상화 발생 가능성 평가를 수행한 후, 다음과 같은 결론은 얻었을 수 있다.

- (1)  $N < 25$ 인 느슨한 포화 모래(SC) 및 자갈층(GC)이 두텁게 분포된 지층에 대해 액상화 예비평가( $(N_1)_{60}$ , 세립질함유량, 입도분포), 액상화 본 평가(표준관입시험( $(N_1)_{60cs}$ ))를 수행한 결과 BT-10(GL(-)3.0 m~(-)7.0 m), BT-15(GL(-)11.0 m~(-)14.0 m), BT-16(GL(-)8.0 m~(-)13.0 m) 시추공 심도에서 지진발생시 액상화 발생 가능성이 예측되었다.
- (2) 보다 상세한 액상화 발생 가능성을 평가하기 위해 UBC3D-PLM 모델을 이용한 “유효응력해석을 통한 액상화 평가”를 수행하였다. 액상화 발생 가능성이 있는 지층의 지반모델은 UBC3D-PLM 모델을, 연암층은 Linear Elastic 모델을, 연암층을 제외한 지층의 지반모델은 HS Small 모델을 적용하였다.
- (3) 지진하중 증가와 동시에 액상화 발생 가능성 있는 지층(UBC3D-PLM 모델이 적용된 지층)에서 지진하중에 의한 과잉간극수압이 급증하였고, BT-10 시추공에서의 과잉간극수압 증가량( $69.13 \text{ kN/m}^2$ )이 BT-15( $61.66 \text{ kN/m}^2$ ) 및 BT-16( $17.01 \text{ kN/m}^2$ ) 시추공에서의 과잉간극수압 증가량보다 크게 평가되었다. 이는 BT-10 시추공에서 액상화 발생 가능성 지층(매립자갈)의 심도(GL(-)3.0 m~(-)7.0 m)가 낮고, 지하수위가 높아 상대적으로 과잉간극수압이 크게 나타나고 있는 것으로 판단된다.
- (4) 지진하중에 의한 심도별 과잉간극수압, 심도별 간극수압 및 심도별 연직유효응력 분석을 통해 지진발생시 지반거동을 예측할 수 있었으며, 특히 심도별 간극수압비( $R_u$ ) 검토를 통해 지하수위 이하의 느슨한 매립층(자갈/모래)의 액상화 발생 가능성을 평가할 수 있었다.
- (5) 개정된 액상화 평가법(KISTEC, 2020)은 BT-10, BT-15 및 BT-16 시추공에 액상화 보강이 필요한 것으로 평가되었으나, 유효응력해석법을 이용한 액상화 평가법은 BT-15 및 BT-16 시추공에서는 액상화가 발생하지 않는 것으로 평가되어 액상화 보강영역을 최소화할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 개정된 액상화 평가법은  $N_{값}$  및 세립분함유량으로만 평가하는 반면, 유효응력해석법은  $N_{값}$ , 과잉간극수압, 간극수압, 연직유효응력, 지반의 투수성 및 전단강도(점착력 및 내부마찰각) 등 보다 많은 액상화 저항요소를 고려할 수 있기 때문이다.
- (6) 따라서 향후 지하수위이하의 느슨한 매립층(모래/자갈)에서 액상화 발생 가능성을 평가하기 위해서는  $N_{값}$  및 세립분함유량을 이용한 액상화 평가는 가급적 지양하고, 다양한 액상화 저항인자를 고려할 수 있는 유효응력해석법을 이용한 액상화 평가를 실시하여 안전하고 보다 경제적인 기초설계를 해야 할 것이다.

## 사사

본 연구는 (주)한국가스기술공사 엔지니어링 사업처와 중소기업 기술경쟁력 향상 지원의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

- Atkinson, J.H., Sallfors, G., 1991, Experimental determination of soil properties, Proceedings of the 10th ECSMFE, Florence, 3, 915-956.
- Beaty, M.H., Byrne, P.M., 1998, An effective stress model for predicting liquefaction behaviour of sand, Geotechnical

- Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE Geotechnical Special Publication, 75, 766-777.
- Beaty, M.H., Byrne, P.M., 2011, UBCSAND constitutive model version 904aR, Documentation Report: UBCSAND Constitutive Model on Itasca UDM Web Site.
- Bentley Systems International Ltd., 2021, PLAXIS 2D CONNECT Edition V21.01, User Manuals, Delft, Netherlands.
- Boulanger, R.W., Ziotopoulou, K., 2015, PM4Sand (version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications, Center for Geotechnical Modeling Report No. UCDC/GM-15/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, California.
- Byrne, P.M., 1991, A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand, Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, 47-55.
- Daftari, A., 2015, New approach in prediction of soil liquefaction, Ph.D. Thesis, Faculty of Geosciences, Geo-Engineering and Mining, Freiberg University of Mining and Technology, 32-70.
- Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T., 1990, Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, 29(4), 36-49.
- KCSC, 2018, KDS Code - 17 10 00: Seismic design general, Korean Construction Standards Center (in Korean).
- Kim, S.J., Hwang, W.K., Kim, T.H., Kang, G.C., 2019, A case study on earthquake-induced deformation of quay wall and backfill in Pohang by 2D-effective stress analysis, Journal of the Korean Geotechnical Society, 35(7), 15-27 (in Korean with English abstract).
- KISTEC (Korea Infrastructure Safety Corporation), 2020, Seismic performance evaluation guideline for existing structures, Retrieved from <https://www.kistec.or.kr/>.
- Lee, J.S., Noh, G.D., 2016, Evaluation of caisson quay wall behavior during the 1995 Kobe earthquake by nonlinear effective stress analysis, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 20(6), 401-412 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.S., Park, T.J., Lee, M.G., Kim, D.S., 2018, Verification of the numerical analysis on caisson quay wall behavior under seismic loading using centrifuge test, Journal of the Korean Geotechnical Society, 34(11), 57-70 (in Korean with English abstract).
- Park, D., Kwak, D.Y., 2009, Evaluation of liquefaction potential with simplified method and effective-stress site response analysis, Journal of the Korean Geotechnical Society, 25(3), 75-82.
- Park, E.S., Kim, B.I., 2022, A study on the application of UBC3D-PLM for soil liquefaction analysis, Journal of the Korean Geosynthetics Society, 21(1), 1-10 (in Korean with English abstract).
- Park, S.S., 2008, Liquefaction evaluation of reclaimed sites using an effective stress analysis and an equivalent linear analysis, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 28(2C), 83-94 (in Korean with English abstract).
- Puebla, H., Byrne, P.M., Phillips, R., 1997, Analysis of CANLEX liquefaction embankments: Prototype and centrifuge models, Canadian Geotechnical Journal, 34(5), 641-657.
- Tran, N.X., Lee, J.S., Kim, S.R., 2017, Evaluation of seismic performance of Takahama wharf using nonlinear effective stress analysis, Journal of the Korean Geotechnical Society, 33(4), 47-56 (in Korean with English abstract).
- Tsegaye, A., 2010, Plaxis liquefaction model, External Report, PLAXIS Knowledge Base.
- Tung, D.V., Tran, N.X., Yoo, B.S., Kim, S.R., 2020, Evaluation of input parameters in constitutive models based on liquefaction resistance curve and laboratory tests, Journal of the Korean Geotechnical Society, 36(6), 35-46 (in Korean with English abstract).