

공간보간 대상 및 지반정보에 따른 액상화 확률지도 비교

Comparison of Liquefaction Probability Map Regarding with Geotechnical Information and Spatial Interpolation Target

송성완¹⁾ · 황범식²⁾ · 조완제[†]

Seongwan Song · Bumsik Hwang · Wanjei Cho

Received: July 7th, 2021; Revised: July 16th, 2021; Accepted: October 18th, 2021

ABSTRACT : The interest of expecting the liquefaction damage is increasing due to the liquefaction in Pohang in 2017. Liquefaction is defined as a phenomenon that the ground can not support the superstructure due to loss of the strength of the ground. As an alternative against this, many studies are being conducted to increase the precision and to compose a liquefaction hazard map for the purpose of identifying the scale of liquefaction damage using the liquefaction potential index (LPI). In this research, in order to analyze the degree of precision with regard to spatial interpolation objects such as LPI value and geotechnical information for LPI determination, liquefaction hazard map were made for the target area. Furthermore, based on the trend of precision, probability value was analyzed using probability maps prepared through qualitative characteristics. Based on the analysis results, the precision of the liquefaction hazard map setting the spatial interpolation object as geotechnical information is higher than that as LPI value. Furthermore, the precision of the liquefaction hazard map does not affect the distribution of the probability value.

Keywords : Liquefaction, LPI, Liquefaction damage prediction, Liquefaction hazard map, Liquefaction probability map

요 지 : 한반도 인근 지역은 지진으로부터 상대적으로 안전지대라고 여겨졌지만, 지난 2017년 포항지역에서 실제 액상화 현상이 발생 및 관측됨에 따라 액상화 현상을 예측하는 연구수요가 높아지고 있다. 액상화는 지반의 강도가 상실되면서 상부 구조물을 지지하지 못하게 되는 현상을 말하며, 이에 대한 대비책으로써 액상화 가능지수(LPI)를 바탕으로 하여 액상화가 발생할 시 동반되는 피해의 규모를 파악하기 위한 목적으로 액상화 재해도를 작성하는 연구 및 정밀도를 향상시키기 위한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 본 연구에서는 액상화 재해도 작성 시 공간보간의 대상을 LPI 값과 LPI를 산정하는데 활용되는 지반정수로 구분하여 공간보간 대상에 따른 정밀도 변화를 분석하였으며, 정량적인 특성을 바탕으로 작성된 액상화 재해도의 작성 방법별 정밀도 변화 양상을 바탕으로 정성적인 특성을 통해 작성된 확률지도의 확률값 변화 양상을 파악하고자 하였다. 분석결과 공간보간대상을 LPI를 산정하기 위한 지반정수로 설정하는 경우의 정밀도가 LPI 자체를 공간보간하는 경우에 비해 높게 나타났으며, 액상화 재해도의 정밀도가 액상화 확률지도의 확률값 분포에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

주요어 : 액상화, LPI, 액상화 피해 예측, 액상화 재해도, 액상화 확률지도

1. 서 론

한반도를 포함하는 우리나라 인근 지역은 지진 및 액상화에 대해 비교적 안전하다고 취급되어왔으나, 최근 지진 발생 횟수가 늘어나는 추세이고 2017년 포항 지진에서는 국내 관측 이래 처음으로 액상화 현상이 발생함에 따라 피해 예측 및 대책 연구의 필요성과 우려에 대한 목소리가 커지는 추세이다.

액상화는 지진 등의 반복 하중이 짧은 시간 동안 작용할 때 간극의 과잉간극수압이 급격히 증가하게 되고 모래 등의 느슨한 사질토 지반의 경우 지반의 변형 및 강도 상실이 유

발됨에 따라 최종적으로 전단 강도를 상실하게 되는 현상을 의미한다(Idriss & Boulanger, 2008). 강도를 상실한 지반은 상부 구조물에 대한 지지력을 상실하게 되므로 막대한 재산 및 인명피해가 발생하게 된다.

이러한 액상화 피해를 예측하는 방법의 일환으로 Iwasaki et al.(1978)은 액상화 가능 지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 지표로써 액상화 피해 규모를 파악할 것을 제안하였다. 기존에 수행된 액상화 발생 여부에 대한 평가는 단일 시추공마다 수행되었기 때문에 시추공 당 하나의 안전율 및 평가 결과가 결정되고 액상화 발생 여부를 판단하였는데, 해당 결과에 액상화 평가 대상 지층의 두께와 깊이에 따른 가

1) Master, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) Senior Researcher, Safety Innovation & Disaster Prevention Division, Korea Expressway Corporation Research Institute

† Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University (Corresponding Author : jei0421@dankook.ac.kr)

중치를 함수로써 고려하여 최종적으로 합산한 것이 LPI이다. 이렇게 시추공 별로 결정된 LPI에 대해 공간보간 기법을 활용함으로써 1차원 형태의 정보를 2차원 형태의 정보로 변환하는 것이 가능하고, 공간보간 기법으로써 Kriging을 활용하여 액상화 재해도를 작성하는 연구가 수행되어왔다(Zhou, 1980; Seed & Idriss, 1981; Douglas et al., 1981; Youd et al., 2001). 국내에서도 이와 같은 연구가 다양하게 수행되고 있으나 경험적 정보를 토대로 수행되는 연구의 특성상 국내의 연구 사례가 충분하지 못하다는 한계가 존재함에 따라 액상화 재해도의 정밀도를 향상시키기 위한 연구의 필요성이 대두되어왔다. 이에 따라 Gang(2019)는 액상화 재해도 작성을 위한 공간보간 수행 시 공간보간 대상에 따라 정밀도가 변화하는 양상을 파악하는 연구를 수행한 바 있다.

이에 따라 본 연구에서는 SPT-N값과 전단파속도(V_s), 콘관입시험값(q_c)을 사용하여 공간보간의 대상을 시추공별로 계산된 LPI로 설정하는 방법(Method A)과 LPI를 결정하기 위한 지반정보로 설정하는 방법(Method B)으로 작성된 액상화 재해도의 정밀도를 분석한 후, 이를 바탕으로 Iwasaki et al.(1982)에 의해 제시된 액상화 피해 규모를 결정하는 경계값, LPI 5와 15를 임계값으로 하는 액상화 확률지도를 작성하여 각 결과를 비교하였다. 액상화 확률지도 작성 시 활용 가능한 정보가 정량적으로 부족할 경우 정성적 특성을 파악하기에 효과적으로 활용할 수 있는 Kriging 기법인 Indicator kriging 기법을 통해 공간보간을 수행하였으며, 이를 통해 예측된 값이 특정 임계값을 넘을 확률을 나타내는 액상화 확률지도를 작성하여 액상화 재해도의 정밀도 경향에 따른 확률값의 경향을 파악하고자 하였다.

2. 액상화 재해도 및 확률지도 작성 절차

2.1 액상화 발생 여부 평가

지진이 발생했을 시 액상화 발생여부를 예측하기 위해 제안된 다양한 기법 중(변형률 기반, 에너지 기반, 응력 기반 등), 가장 보편적으로 활용되는 기법은 동적 응력(cyclic stress)을 기반으로 하여 액상화 발생 여부를 판단하는 기법이다. 이는 액상화를 발생시키는 응력을 뜻하는 전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)와 지진 발생 지반의 지층이 액상화 현상에 대해 저항하는 강도를 의미하는 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)의 비율을 액상화 안전율로 정의하여 해당 값에 따라 액상화 발생 여부를 평가하는 방법으로 Eq. (1)과 같이 안전율을 결정할 수 있다.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

여기서, 지진으로부터 발생하는 전단응력비가 액상화가 발생 가능한 지층의 전단저항강도비보다 큰 값일 경우 액상화 안전율이 1보다 작아지게 되며 이러한 경우 해당 지층에서 액상화가 발생하게 된다. 따라서 액상화가 발생하는 순간의 전단응력비는 전단저항강도비와 동일한 값을 의미하며 이러한 응력은 반복단순전단시험 혹은 반복삼축시험과 같은 실내시험을 통해서 획득하여 액상화 발생 여부를 예측하고자 할 경우 활용될 수 있다. 이렇게 응력을 기반으로 액상화 발생 가능성을 평가하는 기법이 가장 일반적으로 활용되고 있다.

Seed & Idriss(1971)는 보다 간편하게 액상화 평가를 수행하기 위해서 현장 지반조사로부터 획득한 지반정보를 활용하여 전단응력비를 Eq. (2)와 같이 일정깊이에서 지진에 의해 발생한 최대전단응력과 유효수직응력이 고려된 경험식을 제안한 바 있다.

$$CSR = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vc}} = 0.65 \frac{\sigma_{vc}}{\sigma'_{vc}} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (2)$$

여기서, τ_{max} 는 최대전단응력, a_{max} 는 최대 지표면 가속도, σ_{vc} 는 전수직응력, σ'_{vc} 는 유효수직응력, g 는 중력가속도, r_d 는 응력감쇠계수를 의미한다.

최대전단응력은 지진에 의해 발생하는 최대 지표면 가속도(a_{max})를 활용하여 지표면으로부터 일정 깊이 z 에 해당하는 전단응력에 해당하는 값을 Eq. (3)과 같이 결정하여 활용할 수 있다.

$$(\tau_{max})_r = \frac{\gamma \cdot z}{g} a_{max} = \sigma_v \frac{a_{max}}{g} \quad (3)$$

지반의 강도 개념에 해당하는 전단저항강도비 CRR값을 결정하는 방법은 지반정보에 따라 보정 절차를 거친 값이 고려된 경험식을 활용할 수 있으며 가장 보편적으로 활용되는 지반정보는 SPT-N값, 전단파속도(V_s) 그리고 콘관입시험(q_c)값이 있다. 본 연구에서는 활용되는 지반정보에 따른 액상화 재해도 및 확률지도 결과를 비교하고자 하였으며 SPT-N값을 활용하여 CRR값을 결정할 경우 Seed et al. (1984)이 제안한 방법, V_s 값을 활용하여 CRR값을 결정할 경우 Andrus & Stokoe(2000)이 제안한 방법, 그리고 q_c 값을 활용하여 CRR값을 결정할 경우 Robertson & Wride(1998)이 제안한 방법을 활용하여 계산하였다. Table 1은 본 연구

Table 1. a_{max} for determining CSR

Contents	Value
Reappearance cycle (year)	1000
Seismic zone coefficients (Z)	0.11g
Risk coefficient (I)	1.4
Amplification factor (F_a)	2.0
Maximum acceleration (a_{max})	0.308g

에 활용된 최대 지표면 가속도(a_{max})를 정리하여 나타낸 표이다.

2.2 액상화 가능지수

Iwasaki et al.(1982)은 액상화 평가대상 지층의 시작 지점으로부터 20m 깊이에 해당하는 지점까지의 심도별 액상화 안전율과 해당 대상 지층의 두께 및 시작 지점으로부터의 깊이를 고려한 가중치를 같이 고려하여 액상화 가능지수(Liquefaction potential index, LPI)를 Eq. (4)~(8)과 같이 제시하였다.

$$LPI = \int_0^{20} F_i(z) W_i(z) dz \quad (4)$$

$$F_i(z) = 0 \text{ for } F_i(z) = 0 \text{ FS} \geq 1.0 \quad (5)$$

$$F_i(z) = 1 - FS \text{ for } FS < 1.0 \quad (6)$$

$$W_i(z) = 10 - 0.5z \text{ for } z \leq 20m \quad (7)$$

$$W_i(z) = 0 \text{ for } z > 20m \quad (8)$$

Luna & Frost(1998)는 지반조사 결과를 통해 획득한 불연속으로 나타나는 SPT-N값을 고려하여 Eq. (9)와 같이 활용해 현재에도 일반적으로 활용되고 있는 LPI를 제시하였다.

$$LPI = \sum_{i=1}^n F_i(z) W_i(z) H_i \quad (9)$$

여기서, $F_i(z)$ 는 대상 시추공 당 하나씩 결정되는 액상화 안전율, W_i 는 대상 지층의 시작 심도로부터 발생 지점까지의 깊이에 대한 가중치, H_i 는 액상화가 발생할 가능성이 존재하는 지층의 두께를 의미한다.

액상화 발생 가능성을 평가하기 위한 안전율과 액상화 평가 대상 지층의 두께 및 두께에 대한 가중치를 활용하여 액상화 피해 규모를 파악 및 예측할 수 있다. 액상화 현상으로

부터 유발되는 피해는 지반을 구성하는 지층 전체의 안전성에 영향을 받기 때문에 만약 전체 대상 지층 내에서 액상화가 발생하지 않는 영역의 두께가 특정 기준값보다 크다면, 액상화 현상이 발생하지 않는 결과가 나타나게 된다. 따라서, 액상화 피해를 파악하기 위해서는 평가 대상 지층의 두께 및 지표면을 기준으로 액상화 발생 지점까지의 깊이를 고려하여 액상화 평가를 수행할 것이 제안된 바 있다(Ishihara, 1985).

한편, LPI값의 범위에 따라 액상화 피해 정도를 분류하는 기준이 Table 2의 내용과 같이 제시되어 있다(Iwasaki et al., 1982).

Table 2. The scale of liquefaction damage regarding with range of LPI value (Iwasaki et al., 1982)

Range of LPI value	Scale of liquefaction damage
0	very low
$LPI \leq 5$	low
$5 < LPI \leq 15$	high
$15 < LPI$	very high

2.3 Indicator kriging을 활용한 공간보간

지반조사 결과로부터 획득되어 시추공에 포함되는 정보는 지도상에 표시할 때 시추공 위치와 같은 특정 지점의 값을 표시하는 1차원 형태의 정보로서 나타나게 되며, 이에 따라 지도상에 나타난 정보는 대상 지역 내에서 모든 구간에 대해 존재하는 것이 아니라 불연속적으로 존재한다는 한계를 갖는다. 이러한 불연속성 정보를 연속성을 띠는 정보로 변환하기 위해 단순하게 수학적으로 값을 보간하는 방법들이 사용되어 왔으나, 대상 지역이 포함하는 자료의 개수가 많아짐에 따라 신뢰도가 저하되는 경우가 발생하게 되었다(Kim et al., 1993). 이에 대한 개선책으로 지구통계학적 기법인 Kriging이 개발되었으며 기존의 단순 수학적 방법이 지닌 단점을 보완하기 위해 통계학적 방법을 추가하였다. 이에 따라 이미 확보된 기지점 값들 간의 상관관계, 기지점에 포함된 값들과 예측하고자 하는 값들 간의 상관관계, 그리고 기지점에 포함된 값들 간의 영향력 등이 고려된 공간적 보간 수행이 가능하여 기존의 방법에 비해 넓은 영역의 공간보간에 더욱 효과적인 기법으로 활용되고 있다.

Kriging기법은 예측을 실시할 때 수행되는 역행렬 계산으로 인해 기존의 방법보다 소요시간이 오래 걸린다는 단점을 지니지만, 그럼에도 불구하고 경계값에서 발생할 가능성이 존재하는 오차를 최소화할 수 있는 기법이므로 효율적인 공간보간 기법으로써 활용되고 있다.

Kriging 기법은 예측 지점에서의 기댓값 또는 대상 지역

에서의 평균값인 $m(u)$ 이 정의되는 방식에 따라 분류되며 Simple kriging 기법, Ordinary kriging 기법, Universal kriging 기법의 세 가지가 대표적으로 활용되지만, 기지점 값이 분포 경향성을 추정하기 어려운 극단적인 값에 해당하거나 그의 경향과 다소 차이가 있는 특이값에 해당할 때 또는 분포 경향이 특정한 방향으로 편향되어 나타나는 경우 Indicator kriging 기법을 활용하는 방법이 효과적인 경우가 있다. Indicator kriging 기법은 임의의 임계값을 설정한 후 모델을 통해 예측되는 값이 설정된 임계값을 초과하거나 미만일 확률을 결정하는 확률지도로 작성할 경우 활용이 가능하며 임의의 지점에서 예측값이 설정된 임계값을 초과하는 결과가 예측되는 경우를 1, 초과하는 않는 결과가 예측되는 경우를 0으로 출력하는 Eq. (10)과 같은 함수를 통해 예측 확률을 결정한다.

$$I_c(s_i) = \begin{cases} 1 & \text{for } c < Z(s_i) \\ 0 & \text{for } Z(s_i) \leq c \end{cases} \quad (10)$$

여기서, $Z(s_i)$ 는 임의의 지점 s_i 에서 예측값, c 는 임계값을 말한다.

본 연구에서는 Indicator kriging 기법을 활용하기 위한 임계값으로 Table 1에서 언급한 액상화 피해 규모 분류의 경계값에 해당하는 LPI 5와 LPI 15로 결정하였으며, 공간 보간 대상 및 활용된 지반정보별로 액상화 확률지도를 작성하여 비교하는 작업을 수행하였다.

2.4 액상화 재해도 및 확률지도 작성 대상 지역

Fig. 1은 선행연구 및 본 연구의 대상 지역을 나타내며, Fig. 2는 해당 지역에 대한 지반조사 자료 중 일부를 나타낸다. 본 연구에서는 선행연구와 동일한 지역 및 동일한 59개소 시추공 정보(Jung et al., 2014)에 대해 액상화 확률지도

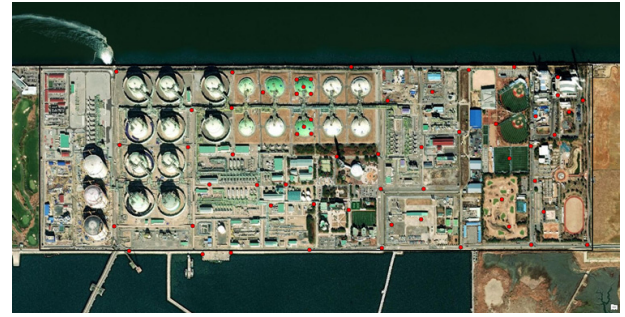


Fig. 1. Target area (Jung et al., 2014)

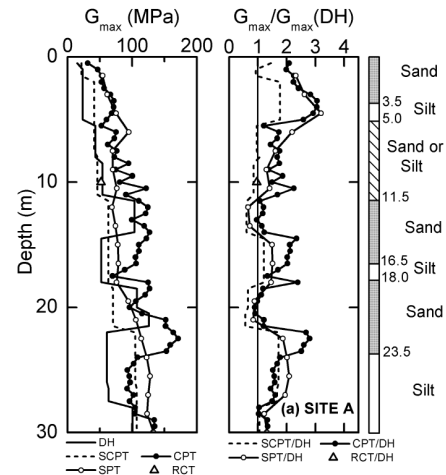


Fig. 2. Borehole data of target area (Jung et al., 2014)

를 작성하고자 하였으며, 결정된 액상화 안전율과 각 시추공 별 액상화 평가대상이 되는 지층의 두께 및 가중치 정보 DB는 Table 3과 같다. 표의 $F_{SPT}(z)$, $F_{V_s}(z)$, $F_{CPT}(z)$ 는 각각의 지반정보로 산정된 안전율로 결정되는 함수로 Eq. (5)와 (6)을 통해 결정된다. 구축된 지반정보 DB에 대해 액상화 재해도 및 확률지도를 작성하여 정밀도에 따른 결과를 비교 및 분석하였다.

Table 3. Database for determining LPI

Borehole No.	H_i	$W_i(z)$	$F_{SPT}(z)$	$F_{V_s}(z)$	$F_{CPT}(z)$	LPI_{SPT}	LPI_{V_s}	LPI_{CPT}
1	10	7.50	0	0.46	0	0	34.37	0
2	8	8.00	0.58	0.83	0.57	38.95	55.35	38.16
3	8	8.00	0	0.23	0	0	14.64	0
4	20	5.00	0	0.58	0	0	43.61	0
5	20	5.00	0	0.59	0	0	44.58	0
6	13	6.75	0.34	0.66	0.07	29.51	57.57	6.49
7	14	6.50	0	0.40	0	0	36.07	0
8	18	5.50	0	0.54	0	0	53.65	0
9	10	7.50	0.09	0.53	0	7.10	39.62	0
10	10	7.50	0.09	0.54	0	7.10	40.81	0

3. 액상화 재해도 작성 방법별 정밀도 분석

본 연구에서는 공간보간 대상 및 활용된 지반정보에 따라 총 6가지 방법으로 액상화 재해도를 작성하여 정밀도를 비교하였으며, 정밀도 분석을 위해 평균제곱근오차(RMSE)와 교차검증을 척도로 활용하였다. RMSE는 기지점 값과 예측된 값의 차이인 잔차의 제곱을 평균하여 제곱근을 취한 것으로, RMSE 값이 작을수록 예측된 값의 정밀도가 높다는 것을 의미한다. 또한, 교차검증은 분석영역의 기지점 자료들 중 하나를 제거한 후 나머지 자료로부터 해당 관측점의 값을 예측하여 기지점 값과 예측된 값의 차이를 통해 공간보간 결과의 정밀도를 분석하는 기법이다.

Table 4는 분석을 통해 계산된 각 재해도의 RMSE를 정리하여 나타낸 표이며, Fig. 3은 각각의 지반정보로 계산된 LPI값 자체를 공간보간하는 방법(Method A)의 교차검증

결과, Fig. 4는 LPI 산정에 활용되는 지반정보를 공간보간하는 방법(Method B)의 교차검증 결과를 각각 나타내었다. Method A를 통해 액상화 재해도를 작성할 경우 RMSE 값은 q_c 값을 활용한 경우가 6.68로 가장 정밀한 것으로 나타났으며, SPT-N값, V_s 순서로 정밀도가 낮아지는 것으로 나타났다. Method B를 통해 액상화 재해도를 작성할 경우에도 RMSE는 q_c 값을 활용한 경우가 2.77로 가장 정밀한 것으로 나타났으며, SPT-N값, V_s 순서로 정밀도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이를 통해 공간보간 대상과 관계없이 q_c 값을 활용하여 액상화 재해도를 작성하는 경우가 가장 높은 정밀도를 나타내었으며, 공간보간 대상의 경우 지반정보를 공간보간하는 Method B가 Method A에 비해 정밀도가 높은 것으로 나타났다. 이는 교차 검증결과를 통해서도 확인할 수 있으며, Method B를 활용한 결과는 1:1 line에 근접한 분포를 보이며 Method A에 비해 더 높은 정밀도를 보이는 것으로 확인되었다.

Table 4. RMSE of each liquefaction hazard map

Used geotechnical information	Method A	Method B
SPT-N	7.64	5.82
V_s	10.18	9.40
q_c	6.68	2.77

4. 액상화 확률지도 작성 방법별 결과 비교

4.1 액상화 가능지수 임계값 5에 대한 확률지도

본 연구에서는 앞서 수행된 정밀도 분석과 동일하게 공간

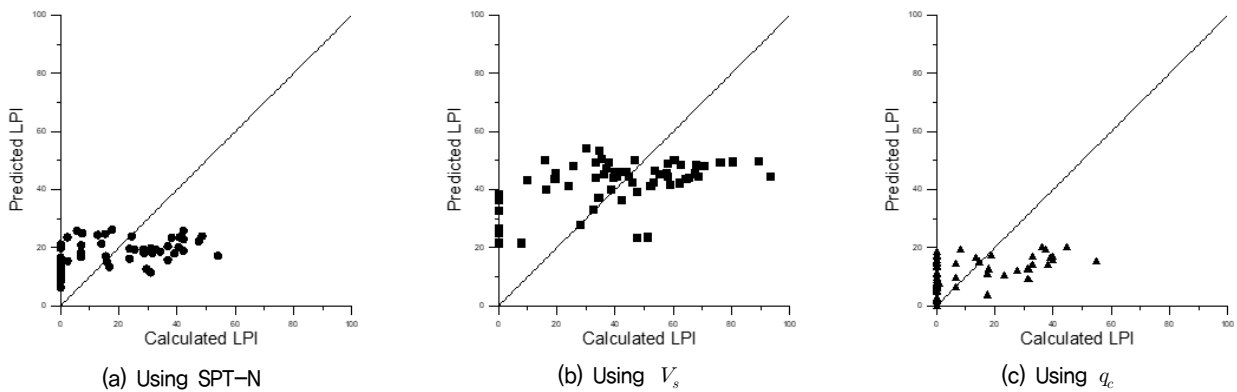


Fig. 3. Cross validation results of liquefaction hazard map in method A

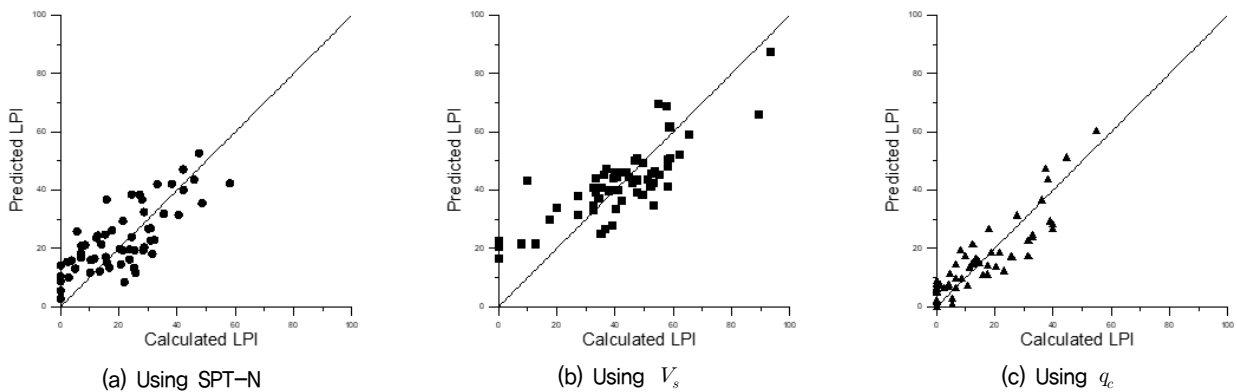


Fig. 4. Cross validation results of liquefaction hazard map in method B

보간의 대상을 산정된 LPI값으로 하는 방법(Method A)과 LPI 산정에 활용되는 지반정보를 공간보간하는 방법(Method B)으로 나누어 총 6가지 방법으로 액상화 확률지도를 작성하였다. 확률지도를 작성하기 위한 임계값은 Iwazaki et al. (1982)이 액상화 피해 규모를 LPI값에 따라 분류한 기준의 경계값에 해당하는 5와 15를 사용하였으며, 각각의 방법으로 산정된 LPI 값이 임계값을 초과할 확률에 대한 확률지도를 제작하였다.

Fig. 5(a)는 Method A를 활용한 경우 중 SPT-N값을 통해

작성된 액상화 확률지도를 나타낸 그림이며 Fig. 5(b)은 Method B에서 SPT-N값을 활용해 작성된 확률지도를 나타낸 그림이다. Method B를 통해 작성된 액상화 재해도의 정밀도가 높으므로 해당 확률지도가 더 신뢰성이 높다고 가정한다면 Method A를 통해 작성된 확률지도는 대상 지역의 중앙부 및 남서쪽 영역은 LPI값이 5를 넘을 확률이 과소평가된 것으로 판단되며, 북쪽 영역은 과대평가된 구역이 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 6(a)은 Method A를 활용한 경우 중 V_s 값을 통해 작

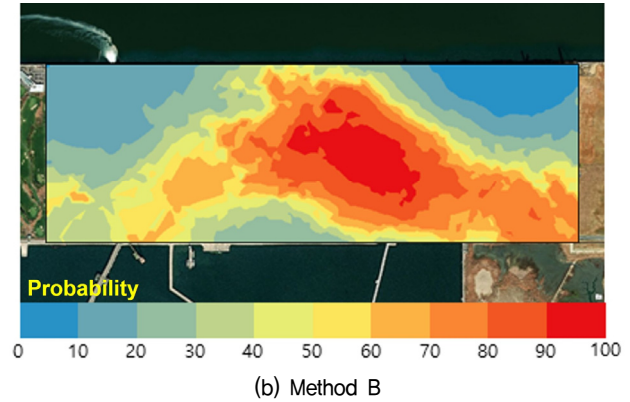
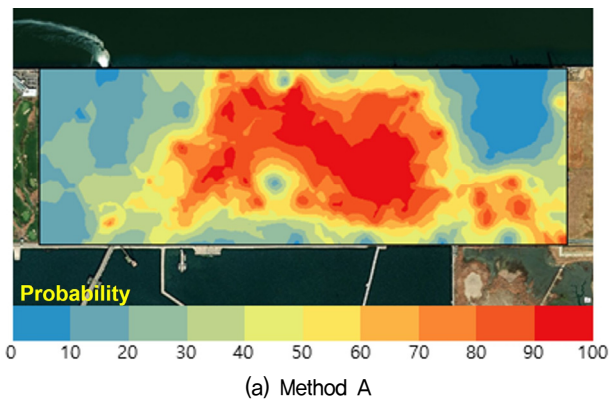


Fig. 5. Liquefaction probability map using SPT-N value for threshold value 5

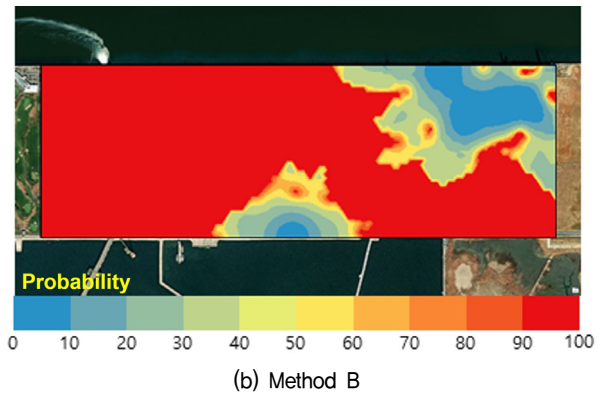
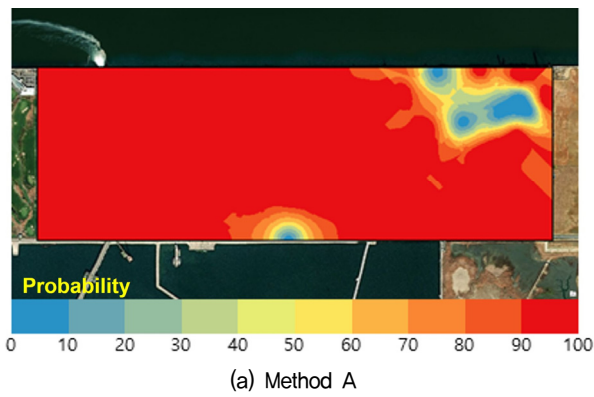


Fig. 6. Liquefaction probability map using V_s value for threshold value 5

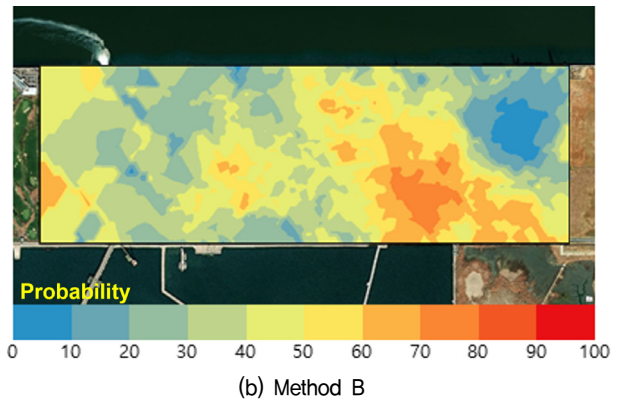
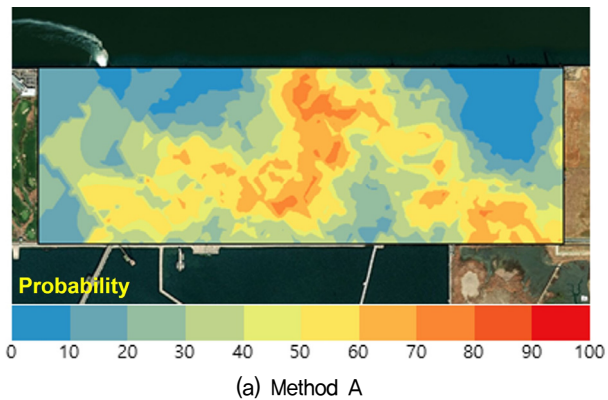


Fig. 7. Liquefaction probability map using q_c value for threshold value 5

성된 액상화 확률지도를 나타낸 그림이며, Fig. 6(b)은 Method B에서 V_s 값을 활용해 작성된 확률지도를 나타낸 그림이다. 마찬가지로 Method B를 활용한 경우의 확률지도가 더 신뢰성이 높다고 가정한다면 Method A를 통해 작성된 확률지도는 대상 지역의 남쪽 및 북동쪽 영역에서 LPI 값이 5를 넘을 확률이 과대평가된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7(a)는 Method A를 활용한 경우 중 q_c 값을 통해 작성된 액상화 확률지도를 나타낸 그림이며, Fig. 7(b)은 Method B에서 q_c 값을 활용해 작성된 확률지도를 나타낸 그림이다.

Method B를 활용한 확률지도가 신뢰성 높다고 가정한다면 Method A를 통해 작성된 확률지도는 대상 지역의 북쪽 영역은 LPI 값이 5를 넘을 확률이 과소평가되었으며, 남쪽 영역은 과대평가된 영역이 존재하는 것으로 나타났다. 또한, 해당 경우 전체적인 영역에 대해 과소평가된 영역이 주를 이루는 것으로 판단된다.

위와 같이 임계값 5에 대하여 6가지 확률지도를 비교한 결과 정밀도가 높아진다고 하여 전체적인 확률분포가 유사하게 나타나는 것이 아니라 대상 지역 내에서도 영역에 따

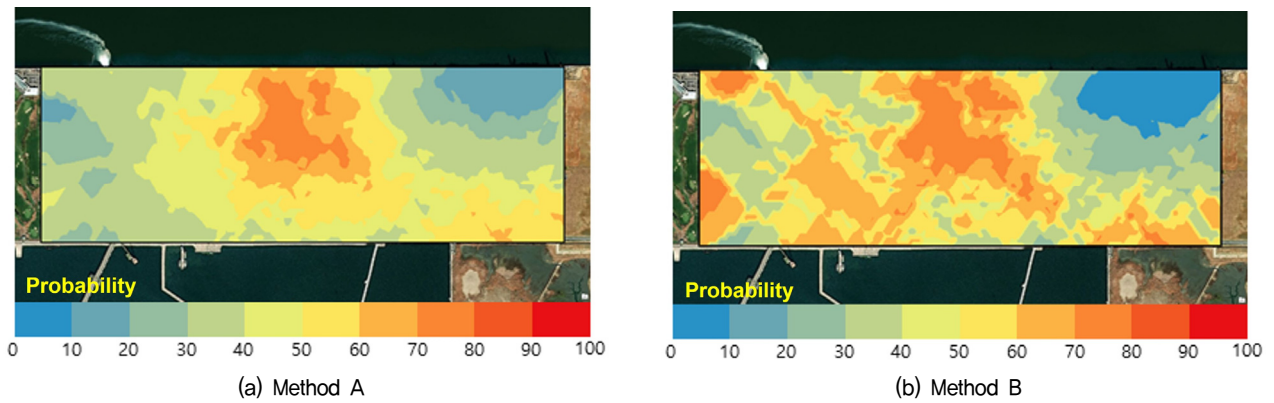


Fig. 8. Liquefaction probability map using SPT-N value for threshold value 15

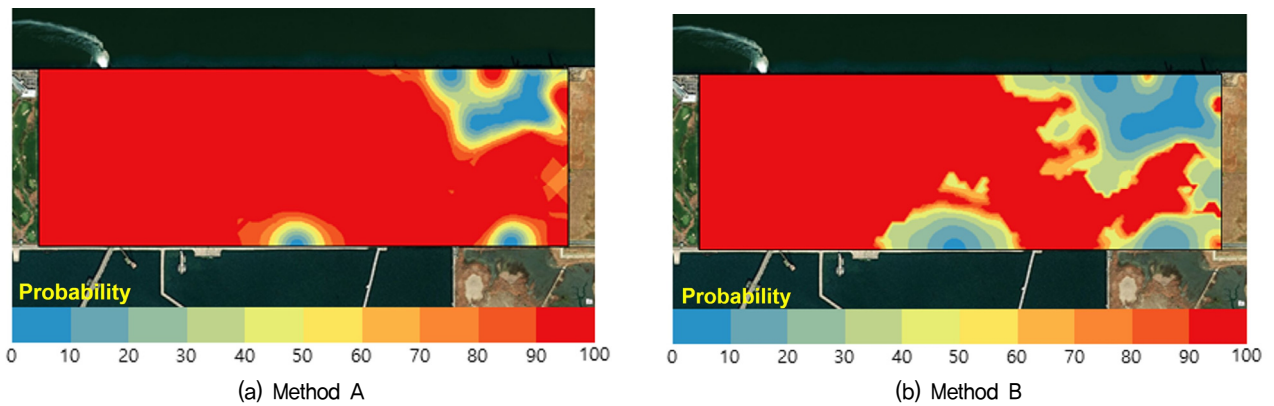


Fig. 9. Liquefaction probability map using V_s value for threshold value 15

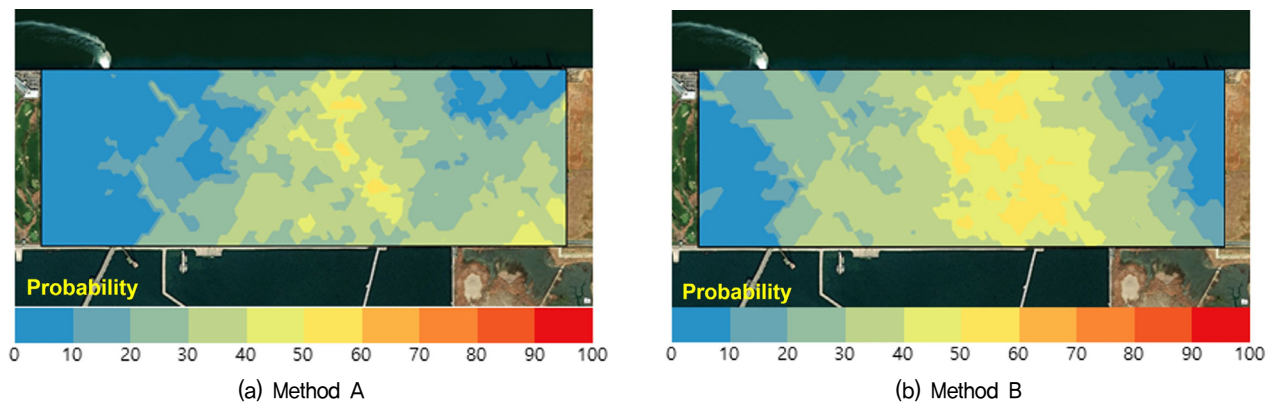


Fig. 10. Liquefaction probability map using q_c value for threshold value 15

라 상이한 경향성을 나타내는 것이 확인되었다. 이는 정밀도가 증가함에 따라 각 기지점 값이 인접 값에 미치는 영향이 뚜렷해지기 때문이라 판단되며, 액상화 피해 예측 결과는 지반정보를 측정 및 결정하는 조건에 영향을 받는 것으로 판단된다.

각 기지점에서의 값 분포는 Method A에서는 SPT-N값을 바탕으로 하여 작성된 액상화 재해도와 V_s 값을 바탕으로 하여 작성된 액상화 재해도의 경우는 임계값 5를 기준으로 뚜렷하게 분리되는 경향을 보였으며 q_c 값을 활용한 경우는 액상화 발생지역이 뚜렷하게 구분되지 않고 확률이 고르게 분포하는 경향을 보였다. Method B에서는 V_s 값을 바탕으로 작성된 재해도와 q_c 값을 바탕으로 작성된 재해도는 동일한 경향을 보였으나 SPT-N값을 활용하여 작성된 재해도는 액상화 확률이 뚜렷한 경계를 갖지 않고 고르게 분포하는 경향을 보였다. 이에 따라 정밀도가 높아질수록 대상 영역 내 지반정수가 보다 정확하게 반영되어 확률값이 고르게 분포하게 되는 것으로 판단하였다.

4.2 액상화 가능지수 임계값 15에 대한 확률지도

다음은 LPI의 임계값을 15로 설정한 확률지도를 작성한 결과이다. Fig. 8(a)은 Method A를 활용한 경우 중 SPT-N값을 통해 작성된 액상화 확률지도를 나타낸 그림이며, Fig. 8(b)는 Method B에서 SPT-N값을 활용해 작성된 확률지도를 나타낸 그림이다. 임계값 15의 경우도 마찬가지로 Method B를 바탕으로 하여 작성된 재해도의 정밀도가 높으므로 해당 확률지도가 신뢰성 높다고 가정한다면 Method A를 통해 작성된 확률지도는 대상 지역의 북동쪽 영역에서 LPI값이 15를 초과할 확률이 과대평가된 경향이 나타났으며, 그 외 전체적인 지역에서 확률이 과소평가된 영역이 대부분을 차지하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9(a)은 Method A를 활용한 경우 중 V_s 값을 통해 작성된 액상화 확률지도를 나타낸 그림이며, Fig. 9(b)는 Method B에서 V_s 값을 활용해 작성된 확률지도를 나타낸 그림이다. Method B를 활용한 경우에 비해 Method A를 통해 작성된 확률지도는 임계값 5에 대한 확률지도와 유사하게 대상 지역의 남쪽 및 북동쪽 영역에서 LPI값이 15를 넘을 확률이 과대평가된 것으로 나타났으며 추가적으로 남동쪽 영역도 흡사한 경향을 나타내는 것으로 확인되었다.

Fig. 10(a)는 Method A를 활용한 경우 중 q_c 값을 통해 작성된 액상화 확률지도를 나타낸 그림이며, Fig. 10(b)는 Method B에서 q_c 값을 활용해 작성된 확률지도를 나타낸 그림이다. Method B를 활용한 확률지도가 신뢰성 높다고 가정한다면

Method A를 통해 작성된 확률지도는 대상 지역의 양 끝쪽 영역은 LPI 값이 15를 넘을 확률이 과소평가되었으며, 중앙 영역은 과대평가된 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

임계값 15에 대한 확률지도도 앞선 임계값 5에 대한 결과와 마찬가지로 정밀도가 높아짐에 따라 일관적인 경향을 보이지 않으므로 액상화 피해 예측 결과는 각 기지점에 존재하는 값을 결정하는 방법에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

각 기지점에서의 값 분포는 Method A에서 V_s 값을 활용한 경우는 임계값 15를 기준으로 뚜렷하게 분리되는 경향을 보였으며 SPT-N값을 활용한 경우와 q_c 값을 활용한 경우는 뚜렷한 구분이 존재하지 않고 확률값이 고르게 분포하는 경향을 보였다. Method B에서는 모든 경우에 대해 뚜렷한 경계를 갖지 않고 고르게 분포하는 경향을 보였다. 이에 따라 임계값 5에 대한 결과와 마찬가지로 정밀도가 높아질수록 대상 영역 내 지반정수가 잘 반영되어 확률값이 고르게 분포하는 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 SPT-N값과 전단파속도(V_s), 콘관입시험값(q_c)을 사용하여 공간보간의 대상을 시추공별로 계산된 LPI로 설정하는 방법(Method A)과 LPI를 결정하기 위한 지반정보로 설정하는 방법(Method B)의 두 가지 방법으로 액상화 재해도 작성 방법에 따른 정밀도를 분석하였으며, 이를 바탕으로 액상화 피해 예측 결과를 정성적으로 나타낼 수 있는 액상화 확률지도를 작성하여 비교하는 작업을 수행하여 다음의 결론을 획득하였다.

- (1) 액상화 재해도의 정밀도 분석결과, 공간보간 대상에 관계없이 콘관입시험값(q_c)을 활용한 재해도의 RMSE가 가장 작게 나타나 정밀도가 가장 높은 것으로 판단되며, RMSE 결과 및 교차검증 결과를 바탕으로 Method B의 정밀도가 Method A에 비해 높은 것으로 판단된다.
- (2) 임계값 5에 대하여 정밀도가 낮은 Method A를 통해 작성된 확률지도와 정밀도가 높은 Method B를 통해 작성된 확률지도의 확률값 분포가 변하는 경향은 정밀도의 경향과 관계가 없는 것으로 나타났다. 이에 따라 각 기지점의 인접 기지점에 미치는 영향이 확률지도 결과에 영향을 미친다고 판단하였으며, 기지점 값을 결정하는 방법의 신뢰도를 향상시키는 것이 중요하다고 판단된다.
- (3) 임계값 15에 대한 확률지도에서도 각 방법에 따른 정밀

도 경향성과 확률지도 내에서 확률값의 변화 경향성은 관계가 없는 것으로 나타났다. 이에 따라 각 기지점 값이 미치는 영향이 존재한다고 판단하였으며, 기지점 값을 결정하는 방법의 신뢰도를 높이는 것이 중요하다고 판단된다.

- (4) 정밀도 분석을 통해 지반정보를 공간보간 하는 경우 및 q_c 값을 활용하는 재해도가 가장 높은 정밀도를 갖는 것으로 확인되었으며, 해당 경우 값의 범위가 산발적으로 분포하는 경향이 나타나는 것으로 보아 정밀도가 높은 방법일수록 확률값이 극단적으로 치우치지 않게 나타나는 것으로 판단된다.

본 연구는 특정 대상 지역에 대한 액상화 피해 규모가 피해 규모 분류 조건에 해당하는 경계값을 초과할 확률을 파악하기 위해 수행되었으며, 연구결과의 신뢰성 획득을 위해서는 추후 대상 지역을 확대하여 정밀도에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 토지이용별 공시지가 및 액상화 손실함수를 활용하여 액상화 발생 시 예상 피해 금액 및 건물 이용 등급에 따른 피해 규모 파악을 위한 연구를 추가적으로 수행할 경우 기초적인 방법론을 제시하는 자료로써 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야 대학 중점연구소 지원 사업의 연구비 지원(NRF-2018R1A6A1A 07025819) “ICT 융복합 기존건축물 내진리모델링 기술 개발”에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Andrus, Ronald D. and Kenneth H. Stokoe II. (2000), Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 126, No. 11, pp. 1015~1025.
2. Douglas, B. J., Olson, R. S. and Martin, G. R. (1981), Evaluation of the cone penetrometer test for SPT liquefaction assessment, Session on In Situ Testing to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE National Convention, St. Louis, MO.
3. Gang, B. J. (2019), Geotechnical information DB construction method for liquefaction assessment, Master's thesis, Dankook University (In Korean).

4. Idriss, I. M. and Boulanger, R. W. (2008), Soil liquefaction during earthquakes, EERI: Earthquake Research Institute, Ca, USA.
5. Ishihara, K. (1985), Stability of natural deposits during earthquakes, In International conference on soil mechanics and foundation engineering, Vol. 11, pp. 321~376.
6. Iwasaki, T., Tatsuoka, K., Tokida, F. and Yasuda, S. (1978), A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation, National Science Foundation UNESCO, San Francisco, CA., pp. 885~896.
7. Iwasaki, T., Tokida, K. I., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H. (1982), Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods, In Proceedings of the 3rd international conference on microzonation, Seattle, Vol. 3, No. 2, pp. 1310~1330.
8. Jung, Y. H., Kim, T. and Cho, W. (2014), Gmax of reclaimed ground on the western coast of Korea using various field and laboratory measurements, Marine Georesources and Geotechnology, Vol. 32, No. 4, pp. 351~367.
9. Kim, I. K., Sung, W. M. and Jung, M. Y. (1993), Development and Validation of Multi-Purpose Geostatistical Model with Modified Kriging Method, J. Koran Inst. Mining Geol., Vol. 26, No. 2, pp. 207~215 (In Korean).
10. Luna, R. and Frost, J. D. (1998), Spatial liquefaction analysis system, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 48~56.
11. Robertson, P. K. and Wride, C. E. (1998), Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, Canadian geotechnical journal, Vol. 35, No. 3, pp. 442~459.
12. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, J. Soil Mechanics and Foundations Div, ASCE, Vol. 97, No. 9, pp. 1249~273.
13. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1981), Evaluation of Liquefaction Potential of Sand Deposits Based on Observations of Performance in Previous Earthquakes, Session on In Situ Testing to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE National Convention, St. Louis, MO, October.
14. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. Jr. and Chung, R. (1984), The Influence of SPT Procedures on Soil Liquefaction Resistance Evaluations, Report No. UCB/EERC-84/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
15. Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B. and Stokoe, K. H. (2001), Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol. 127, No. 10, pp. 817~833.
16. Zhou, S. (1980), Evaluation of the liquefaction of sand by static cone penetration test, 7th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, Vol. 3, pp. 156~162.