

공간보간 대상 및 지반정보에 따른 액상화 재해도 비교

Comparison of Liquefactive Hazard Map Regarding with Geotechnical Information and Spatial Interpolation Target

송 성 완¹ Song, Seong-wan
황 범 식² Hwang, Bumsik
조 완 제³ Cho, Wanjei

Abstract

Due to the Pohang earthquakes in 2017, concerns are increasing that Korea is no longer safe from liquefaction, and needs the research to take proper measures for liquefaction. Liquefaction is defined as the loss of shear strength of the ground. In order to solve this problem, many studies, such as composing a liquefaction hazard map using Liquefaction Potential Index (LPI), have been conducted. However, domestic researches on the comparative analysis of liquefaction prediction results are not sufficient. Therefore, in this study, liquefaction hazard maps were composed using the standard penetration test results, shear wave velocity values, and cone penetration test results. After that, the precision was determined by comparing the calculated LPI using the geotechnical information and predicted LPI via spatial interpolation target. Based on the analysis results, the predicted LPI value using geotechnical information is more precise than using calculated LPI value.

요 지

지난 2017년 포항 지진에 의해 액상화가 관측됨에 따라 액상화 피해를 예측하는 연구수요가 높아지고 있다. 액상화 현상은 지반이 전단 강도를 상실하는 현상을 말하며 상부 구조물이 가라앉는 피해가 발생하게 된다. 이에 대한 대비책으로써 액상화 가능지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 활용하여 액상화 피해 규모를 파악하는 연구가 수행되어 왔으나 국내의 연구 사례 또한 충분하지 못한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 공간보간 대상에 따른 액상화 재해도 및 액상화 가능지수를 결정하는 지반정보에 따른 액상화 재해도를 작성하고 각 재해도의 정밀도를 비교하여 액상화 재해도의 정밀도를 향상시키는 방안을 제안하고자 하였다. 그 결과, 공간보간의 대상을 LPI 결정에 활용되는 지반정보로 하는 것이 LPI값 자체를 공간보간 하는 경우에 비해 높은 정밀도를 보이는 것으로 나타났다.

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

1 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 석사 (Member, Master, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Dankook Univ.)

2 정희원, 한국도로공사 도로교통연구원 안전혁신연구실 책임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute)

3 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Dankook Univ., Tel: +82-31-8005-3507, jei0421@dankook.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지진과 같이 큰 반복하중이 짧은 시간 동안 발생하면 간극 속 과잉간극수압이 급격히 증가하게 된다. 모래와 같은 느슨한 사질토의 경우 토층의 변형과 강도와 강성의 감소를 유발, 최종적으로 전단 강도가 상실되는 현상이 발생하는데 이러한 현상을 액상화 현상이라 정의할 수 있다(Idriss and Boulanger, 2008).

액상화 평가는 반복삼축시험, 반복단순전단시험과 같은 실내시험을 수행하여 발생 여부를 평가할 수 있지만, 실내시험은 평가 대상 지역에서 불교란 시료를 채취해야 한다는 어려움이 동반되므로 현장 지반조사로 획득한 지반정보를 활용하여 액상화 평가를 수행하고자 하는 많은 연구가 수행되어왔다(Seed and Idriss, 1981; Douglas et al., 1981; Youd et al., 2001). 대표적으로 Idriss and Seed(1971)가 제안한 SPT-N값 기반의 액상화 평가법이 있으며 액상화 평가를 수행하기 위한 기준의 바탕이 되었다. 국내 액상화 평가 기준 또한 앞서 언급한 SPT-N값을 기반으로 하는 액상화 평가법을 기초로 하여 규정되어 있다. Iwasaki et al.(1978)은 액상화 가능지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 제안하여 액상화 피해 규모를 파악하고자 하였다. 기존에 수행된 액상화 평가는 단일 시추공 별로 수행되어 시추공 당 하나씩 결정된 안전율을 바탕으로 액상화 발생 여부를 평가했으며 여기에 지표면으로부터의 깊이와 깊이에 따른 가중치를 고려하여 합산한 것이 LPI이다.

하지만, 액상화 피해 예측을 위해 활용되는 지반정보는 일반적으로 시추조사를 통해 획득된 1차원 형태의 자료로 나타나기 때문에 해당 대상 지역의 전체적인 특성을 대표하지 못한다는 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)과 공간보간을 통해 액상화 재해도를 작성함으로써 해결하고자 하는 여러 선행 연구들이 수행되어왔다(Baek and Choi, 2019a; Baek and Choi, 2019b; Baise et al., 2006; Chiasson et al., 1995; Jaksa et al., 1993; Kang et al., 2000). Baek and Choi(2019a)는 국내 수도권 지역 14,040개의 시추공 데이터를 수집하여 지반증폭계수를 이용한 액상화 평가를 실시하고, 최대기반암가속도에 대한 액상화 위험지도를 작성하였다. 또한, 이를 바탕으로 실시간 예측이 가능한 액상화 위험지도 작성을 위해 지진가속도와와의 상관관계 분석을 통해 가상의 지진에 대한 액상화 위험지도를 작성하였다. Baek and

Choi(2019b)는 국내 수도권 지역의 전력구 매설지반을 대상으로 지진 재현주기 1,000년을 고려한 최대기반암가속도 0.154g에 대한 지진시 위험도를 평가하였다. Kang et al.(2000)은 국내 항만 및 여항시설 내진설계표준에 따라 수정 Seed와 Idriss방법을 이용하여 국내 연안지역을 대상으로 액상화 평가를 수행하고, 액상화 가능지수(LPI)와 등가 액상화 안전율(FE)을 이용하여 액상화 재해도를 작성하였다. 이를 통해 등가 액상화 안전율의 적합성을 평가하는 연구를 수행하였다. 이러한 액상화 피해 예측을 위한 연구는 경험을 바탕으로 수행되기 때문에 연구의 수행 사례가 증가할수록 신뢰도를 향상시킬 수 있지만, 국내는 액상화 피해 예측에 관한 연구 사례는 다소 부족한 실정이며, 액상화 재해도의 정밀도 향상을 위한 연구는 아직 수행되지 않은 것으로 확인되었다.

따라서 본 연구에서는 액상화 피해 예측을 위한 재해도를 작성하기 위해 수행되는 공간보간의 대상을 LPI로 설정하는 방법과 LPI를 결정하기 위한 지반정보로 설정하는 방법 및 LPI 결정에 활용되는 지반정보인 SPT-N값 및 V_s 값, q_c 값을 활용하는 각 방법에 대한 액상화 재해도를 작성하기 위한 DB를 구축하고 정밀도를 비교함으로써 신뢰도 높은 액상화 예측 방안을 제안하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 액상화 가능지수

액상화 발생 가능성을 평가하기 위한 안전율과 액상화 평가 대상의 지층 두께 및 두께에 대한 가중치를 활용하면 액상화 발생에 따른 예상되는 피해의 규모를 예측할 수 있다. Ishihara(1985)는 액상화 현상이 발생했을 때 동반되는 피해가 지반을 구성하고 있는 지층 전체의 강도에 영향을 받는다고 언급한 바 있으며, 만약 대상영역 내 지표층에서 액상화가 발생하지 않는 영역의 두께가 3m 보다 크면, 액상화로 인한 지반 강도 상실 현상이 발생하지 않는다고 언급하였다.

LPI는 Iwasaki et al.(1978)이 이를 바탕으로 하여 액상화 피해 규모를 파악하기 위해서 제안한 지표이다. Iwasaki et al.(1978)은 액상화로부터 발생하는 피해 규모를 파악하기 위해 액상화가 발생하는 취약 지점의 깊이 및 액상화가 발생할 수 있는 지층의 두께에 대한 영향을 고려하고자 하였으며, 액상화 평가의 대상이 되는

지층 두께, 평가 대상 지층의 시작 지점으로부터 액상화 발생 지점까지의 거리, 값이 1 미만인 액상화 안전율과 비례한다고 정의하였다. 이에 따라 Iwasaki et al. (1982)은 현재 일반적으로 알려진 식 (1)을 제안하였다. 식 (1)은 액상화가 발생하여 지반이 강도를 상실할 경우 지표에 유효한 영향을 미칠 것으로 판단되는 20m 깊이까지의 액상화 취약성을 누적하여 고려되었으며, 지표면에서부터의 심도를 포함하는 식으로써 정의되었다.

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) dz \quad (1)$$

$F(z)$ 는 깊이 별로 액상화 안전율을 통해 결정할 수 있는 함수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. $W(z)$ 는 액상화가 발생한 지점의 지표로부터 깊이가 고려된 가중치의 함수로 정의되며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, 지표로부터 20m까지의 액상화에 대한 누적값이므로 지표면에 가까울수록 커지게 된다.

$$F_i(z) = 1 - FS \quad \text{for } FS < 1.0 \quad (2)$$

$$W_i(z) = 10 - 0.5z \quad \text{for } 0 \leq z \leq 20m \quad (3)$$

Luna and Frost(1998)은 최종적으로 SPT-N값과 같이 불연속적으로 얻어지는 지반정보를 활용하여 LPI를 획득하기 위하여 액상화 평가 대상이 되는 지층의 두께인 H_i 값을 활용하여 식 (4)를 제안하였다.

$$LPI = \sum_{i=1}^n F_i(z) W_i(z) H_i \quad (4)$$

한편 Iwasaki et al.(1982)은 일본을 대상으로 과거에 발생된 지진 85회에 대한 액상화 피해 사례를 이용하여 계산된 LPI 크기에 따른 액상화 피해 규모를 Table 1과

Table 1. 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

같이 분류하였다. LPI가 5 이하일 때는 액상화로 인해 발생하는 실질적인 피해 규모가 작지만, 15를 초과하는 경우 대책 마련이 시급한 정도의 막대한 피해가 발생할 것으로 예측하였으며 해당 분류는 현대에도 LPI값을 활용하여 액상화 피해 규모를 파악하는 척도로써 활용되고 있다.

2.2 Kriging을 활용한 공간보간

지반조사 결과로 얻어진 시추공 정보는 지도상에서 지역 전체의 값을 나타내는 2차원 형태가 아닌 특정 지점의 값을 나타내는 1차원 형태로 도시되며 이는 지도상에 나타난 정보가 불연속적이라는 것을 의미한다. 이렇게 불연속적으로 존재하는 정보를 연속적인 정보로 나타내기 위해 단순 평균기법, 삼각형기법, 거리 반비례기법 등과 같이 단순한 수학적 방법으로 정보를 보간하는 방법을 사용하는 경우도 있으나, 대상 지역의 자료 개수가 많아질수록 신뢰도가 저하하는 한계가 존재한다(Kim et al., 1993). 반면 지구통계학적 기법의 하나인 Kriging은 수학적 방법의 단점을 보완하고자 통계학적 방법을 추가한 기법으로, 이미 획득한 기지점 값 간의 상관관계 및 기지점 값과 예측을 통해 획득하고자 하는 값 간의 상관관계, 기지점 값의 경향 등을 고려한 공간보간 수행이 가능하여 상대적으로 넓은 영역의 공간보간에 효과적인 기법으로 활용되고 있다.

Kriging 기법은 지역 변수 개념으로부터 유도되는데, 지역 변수란 대상 지역의 정보가 지역적 특성에 따라 연관성을 나타내기는 하지만 일반적인 함수로 정의하기에 난해한 변수를 뜻한다. 또한, Kriging 기법은 최소 오차이론으로부터 파생되었는데, 최소오차이론을 적용하는 것으로 기지점 값과 예측된 값 사이의 오차 분산을 최소화하여 예측값을 최적의 모델로 결정할 수 있는 공간보간을 가능하게 한다. 따라서 Kriging 기법은 공간적 특성에 따른 변수로부터 파생되는 오차를 예측하는 것이 가능할 뿐 아니라 기지점 값과 예측값 간의 상관관계로부터 파생되는 오차를 확인하는 것이 가능하다는 장점을 갖는다. 또한 예측값을 결정할 때 기지점 값의 경향을 고려할 수 있고 기지점 값의 손상 없이 공간보간을 수행할 수 있다. 이 같은 과정이 소요되는 Kriging 기법은 예측 과정 내에서 실시되는 역행렬 계산으로 인해 다른 방법에 비해 시간이 더 소요된다는 단점에도 불구하고 경계지역에서 발생하는 오차를 최소화시킬 수 있

으므로 효율적인 공간보간 기법으로 활용되고 있다.

Kriging 기법은 예측 지점의 값으로 예상되는 기댓값 또는 대상 영역의 평균값인 $m(u)$ 를 최초로 정의하는 방법에 따라 기법을 분류하는 것이 가능하며 Simple Kriging, Ordinary Kriging, Universal Kriging의 세 가지 기법이 가장 대표적으로 활용된다. 본 연구에서는 Deutsch (1996)가 일반적으로 가장 많이 활용된다고 언급한 Ordinary Kriging을 활용하여 공간보간을 수행하였다.

Ordinary Kriging은 지역의 평균값인 $m(u)$ 를 미지의 값으로 취급하지만 국소적으로 한정된 대상 지역 내에서 일정하게 유지된다고 평가하는 기법이다. Simple Kriging은 $m(u)$ 값을 특정 상수로 취급하는 기법이지만, 이는 모든 현장 상태를 고려한 방법이 아니므로 특정 대상 지역의 환경을 고려하지 못한다는 단점이 존재한다. 따라서 Ordinary Kriging 기법은 $m(u)$ 값을 미지의 값으로 취급하며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{ok}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{ok}(u) z(u_{\alpha}) \text{ with } \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{ok}(u) = 1 \quad (5)$$

여기서, $Z_{ok}^*(u)$ 는 미지점 u 에서 확률변수 Z 의 예측값을 말하며, $\lambda_{\alpha}^{ok}(u)$ 는 α 번째 표본 자료에 부여하는 가중치를 의미한다. Simple Kriging과 Ordinary Kriging의 차이점은 일정한 값으로 간주하는 전체 평균값과 지역 평균값의 차이로부터 발생한다. 일반적으로 $\lambda_{\alpha}^{ok}(u)$ 는 양의 값으로 나타나는데, 만약 기지점 자료들 중 작은 값이 같이 존재하는 대상 지역 내에서는 지역 평균이 전체 평

균보다 작으므로 Ordinary Kriging으로부터 예측되는 값은 Simple Kriging으로부터 예측되는 값보다 작게 결정된다. 이와 다르게 큰 값들을 포함하는 기지점 자료들이 포함된 대상 지역에서는 지역의 평균값이 전체의 평균값보다 크기 때문에 Ordinary Kriging으로부터 예측되는 값은 Simple Kriging으로부터 예측되는 값보다 크게 나타나게 된다(Goovaerts, 1997). Deutsch(1996)는 Ordinary Kriging을 활용해 값을 예측하는 경우 예측된 값의 분포 범위는 기지점 값의 분포 범위에 비해 축소되는 경향을 나타낸다고 언급한 바 있다.

시추공 별로 LPI값 혹은 재해도 작성을 위한 지반정보가 구축되면 해당 데이터를 대상 지역 안에 위치한 점 형태의 정보로 나타낸 후 공간보간을 통해 전체 대상 지역에 대해 2차원 형태로써 값을 나타내는 액상화 재해도를 작성할 수 있다. 국내에서도 이처럼 1차원 정보인 LPI를 활용하여 액상화 피해 예측을 위한 다양한 연구가 수행되었다(Kang et al., 2000; seo et al., 2009; Jung et al., 2014).

3. 액상화 재해도 작성

3.1 액상화 재해도 작성 대상 지역

Fig. 1은 본 연구의 액상화 재해도 작성 대상 지역을 나타낸 그림이며, Fig. 2는 해당 지역의 시추공 자료 중 일부를 나타내는 그림이다. 본 연구에서는 인천광역시 송도동에 위치한 3.23km^2 넓이 부지의 시추공 59개소에



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

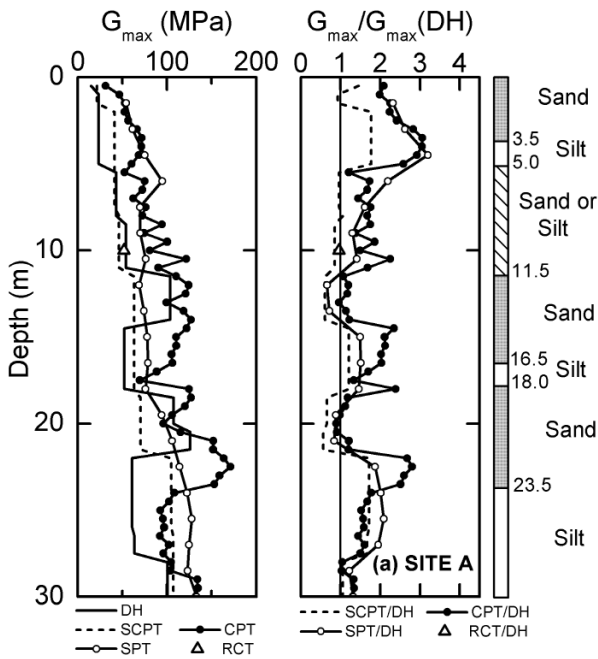


Fig. 2. Borehole data of target area (Jung et al., 2014)

대한 지반정보(Jung et al., 2014)를 획득하여 공간보간 대상 및 활용된 지반정보에 따른 액상화 재해도의 정밀도를 비교하고자 하였다. 액상화 재해도는 두가지 방법으로 작성되었으며, 본 연구에서는 LPI를 공간보간의 대상으로 하는 방법을 Method A, LPI를 결정하기 위한 지반정보를 공간보간의 대상으로 하는 방법을 Method B로 정의하였다. 각 방법별로 N 값, V_s 값, q_c 값을 활용하여 총 6가지 재해도가 작성되었으며, 최종적으로 이렇게 작성된 재해도의 정밀도를 비교하여 본 대상 지역에서 가장 정밀도가 높은 방법을 파악하였다.

LPI를 결정하기 위해서는 대상 시추공에 대한 안전율 결정이 선행되어야 한다. 액상화 안전율은 지반의 강도 개념인 CRR(cyclic resistance ratio)값을 지반에 작용하는 외력 개념인 CSR(Cyclic stress ratio)값으로 나누어 결정할 수 있으며, 우선 CRR값은 다음과 같이 결정하였다. CRR값을 결정할 때 N 값의 경우 Seed et al.(1984)이 제안한 방법, V_s 값의 경우 Andrus and Stokoe(2000)이 제안한 방법, 그리고 q_c 값의 경우 Robertson and Wride (1998)이 제안한 방법을 활용하였다. 또한 CRR값을 결정할 때 N 값, V_s 값, q_c 값을 활용하는 모든 경우에 대하여 상재압 보정 과정을 수행하였다. 상재압에 대한 보정은 시추공 정보로부터 획득 가능한 지하수위 및 단위중량 정보를 활용함으로써 결정할 수 있다. 본 연구에서는 대상 지역 토층의 전체단위중량(γ_t)은 시추공 정보에 명

시된대로 $1.7t/m^3$ 로 결정하였으나, 지하수위에 대한 정보는 명시되어있지 않았기 때문에 가정을 통해 해당 값을 활용하였으며 내진설계 일반(2018)에서 명시하는 대로 지하수위 상부에 위치한 토층은 액상화 평가 대상으로부터 제외된다는 항목을 고려하여 최종적으로 지하수위는 지표면을 따라 위치하는 것으로 결정하였다. 이후 보정 절차를 거친 각 지반 정보 및 경험식을 통해 CRR값을 획득하였다.

다음으로 CSR값을 Seed and Idriss(1984)가 제안한 방법을 바탕으로 다음의 과정을 통해 결정하였다. 내진설계 일반(2018)에서는 CRR값을 획득하기 위해 필요한 최대지반가속도 a_{max} 를 결정하기 위하여 지반운동의 수준을 성능목표 및 등급에 따라 분류하였으며, 이 중 지진 발생 시 혹은 그 이후에 구조물의 붕괴를 방지하는 것을 목표로 설계하는 붕괴방지수준을 기준으로 1등급에 해당하는 평균재현주기 1000년의 경우를 가정하였다. 또한, 2013년 소방방재청에서 공표한 국가지진위험 지도에서는 재현주기 500년을 기준으로 우리나라의 행정구역에 따라 지진구역계수를 구분하고 있으며 본 연구에서는 평가대상 지역의 행정구역상 위치인 인천광역시에 해당하는 $0.11g$ 를 사용하였다. 이때 재현주기 1000년의 경우를 가정했으므로 위험도 계수는 1.4를 적용하였다. 한편, 국토교통부에서 제정한 내진설계 일반(KDS 17 10 00)에서는 N 값을 기준으로 지반의 등급을 분류하였는데, N 값이 20 이하일 경우 액상화 평가대상 지반이 되기 때문에 N 값이 20 이하인 경우를 모두 포함하는 E등급의 연약한 토사지반으로 분류하였다. 또한, E등급의 연약한 토사지반에서 단주기 증폭 계수를 2.00을 사용하도록 명시되어 있으므로 해당 값을 사용하였다. 이에 따라 최종적으로 Table 2와 같이 a_{max} 값을 결정하였으며 a_{max} 값과 각 시추공 별 지반정보를 활용하여 각 시추공 별 CRR값을 결정하였다.

Table 3에는 위의 절차를 수행하여 결정된 액상화 안전율, 시추공 별 대상지층의 두께 정보 및 가중치 정보,

Table 2. 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

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

최종적으로 산출되는 LPI 값의 DB 일부를 정리하였다. 액상화 재해도 작성 방법 중 방법 A의 경우 최종적으로 결정된 LPI값을 공간보간하였으며 방법 B의 경우 각각의 지반정보에 대하여 공간보간을 수행하였다.

3.2 정밀도 비교 척도

본 연구에는 평균제곱근오차(RMSE)와 교차검증을 척도로 활용하여 작성된 액상화 재해도의 정밀도를 비교하는 작업을 수행하였다. RMSE는 기지점 값과 예측된 값의 차이인 잔차를 제곱들의 평균값에 제곱근을 취한 것으로 식 (6)과 같이 결정할 수 있으며 정밀도를 비교하고자 하는 대상의 단위를 그대로 비교할 수 있다. 또한, RMSE 값이 작을수록 예측된 값의 정밀도가 높다는 것을 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2}{n}} \quad (6)$$

여기서, e_n 는 기지점 값과 예측값의 차이인 잔차, n 는 자료의 개수를 의미한다. 다른 정밀도의 척도인 교차검증이란, 분석영역의 기지점 자료들 중 하나를 제거한 후 나머지 자료로부터 해당 관측점의 값을 예측하여 기지점 값과 예측된 값의 차이를 통해 공간보간 결과의 정밀도를 분석하는 기법으로 기지점 값과 예측된 값의 차이가 나타내는 경향을 한눈에 확인할 수 있도록 그래프로써 나타낸다. 위의 두 가지 척도를 바탕으로 총 6개의 액상화 재해도의 정밀도를 비교하고자 하였다.

4. 액상화 재해도 작성 방법 별 결과 비교

4.1 액상화 가능지수를 공간보간하여 작성된 액상화 재해도

본 연구에서는 공간보간 대상 및 활용된 지반정보에 따라 총 6가지 방법으로 액상화 재해도를 작성하여 정밀도를 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

Fig. 3은 방법 A 중 SPT-N값을 활용하여 작성된 액상화 재해도를 나타낸 그림이다. SPT-N값을 활용한 경우 계산을 통해 결정된 LPI값은 최솟값 0에서 최댓값 54.01 사이에 분포하는 것으로 결정되었으며 공간보간을 통해 예측된 LPI값은 최솟값 3.80에서 최댓값 28.26 사이에 분포하는 것으로 결정되었다. 계산된 LPI값의 산술평균은 16.95, 예측된 LPI값의 산술평균은 16.03으로 나타났으며 공간보간으로 예측된 값의 산술평균이 작게 나타난 것에 비해 전체 값의 범위는 공간보간으로 예측된 범위가 크게 줄어든 것으로 보아 공간보간된 LPI값이 전체적으로 밀집되어 분포하는 경향을 나타내는 것

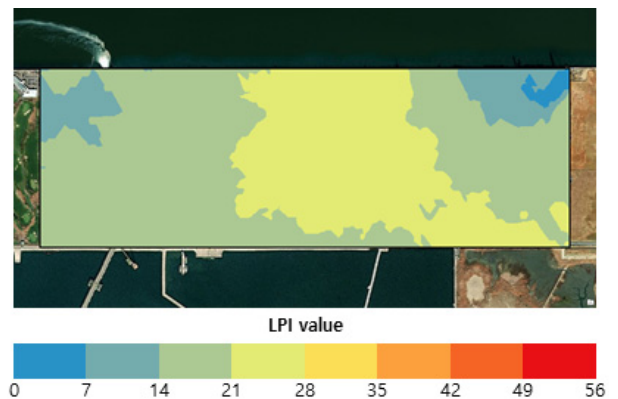


Fig. 3. Liquefaction hazard map using SPT-N value in method A

으로 판단하였다.

Fig. 4는 방법 A 중 V_s 값을 활용하여 작성된 액상화 재해도를 나타낸 그림이다. V_s 값을 활용한 경우 계산을 통해 결정된 LPI값은 최솟값 0에서 최댓값 93.23 사이에 분포하는 것으로 결정되었으며 공간보간을 통해 예측된 LPI값은 최솟값 17.73에서 최댓값 55.85 사이에 분포하는 것으로 결정되었다. V_s 값을 활용한 액상화 재해도도 SPT-N값을 활용한 재해도와 마찬가지로 공간보간된 LPI값이 전체적으로 밀집되어 분포하는 경향을 나타내며 예측값을 결정한다고 판단하였다. 계산된 LPI값의 산술평균은 41.66, 공간보간으로 예측된 값의 산술평균은 36.79로 공간보간을 통해 결정된 값이 더 낮아지는 경향을 나타냈다. 또한, V_s 값을 활용하여 계산된 LPI값이 다른 지반정수를 활용하여 계산된 LPI값에 비해 더 크게 계산되어 액상화에 취약한 것으로 파악되었고, 이는 지반정수 획득 방법에 따른 차이로 판단된다.

Fig. 5는 방법 A 중 q_c 값을 활용하여 작성된 액상화 재해도를 나타낸 그림이다. q_c 값을 활용한 경우 계산을 통해 결정된 LPI값은 최솟값 0에서 최댓값 54.77 사이

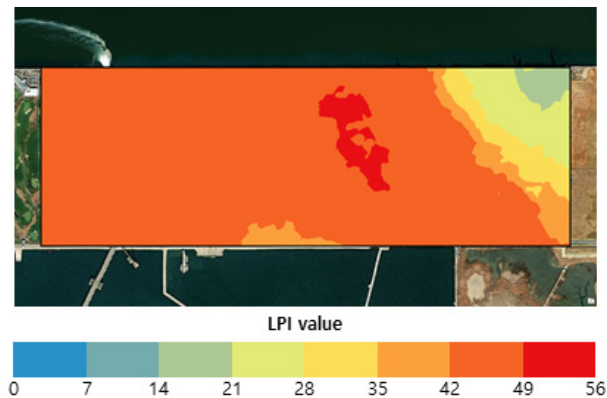


Fig. 4. Liquefaction hazard map using V_s value in method A

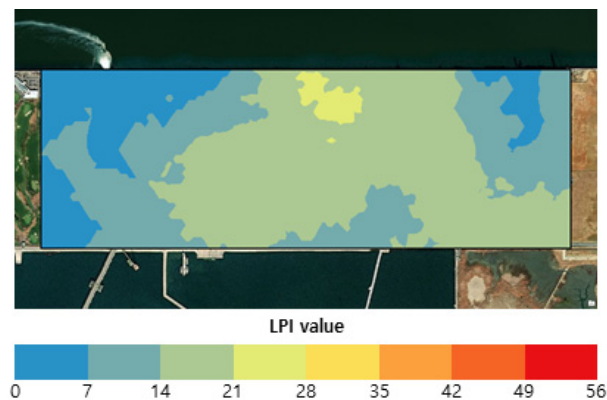


Fig. 5. Liquefaction hazard map using q_c value in method A

에 분포하는 것으로 결정되었으며 공간보간을 통해 예측된 LPI값은 최솟값 0에서 최댓값 25.77 사이에 분포하는 것으로 결정되었다. 이는 모든 지반정보를 활용한 재해도 중에서 계산된 값의 범위와 예측된 값의 범위가 가장 작게 차이나는 경우인 것으로 확인되었다. q_c 값을 활용한 경우는 공간보간된 예측값의 범위가 축소되는 경향을 나타낸 것은 앞선 두 경우와 동일했으나 계산된 값의 산술평균이 10.83였으나 공간보간으로 예측된 산술평균이 12.89로 증가하여 앞선 두 경우와 다른 양상을 나타내었다.

4.2 지반정보를 공간보간하여 작성된 액상화 재해도

다음은 액상화 재해도 작성 시 LPI값이 아닌 LPI값을 결정하는 지반정보를 공간보간하는 방법 B를 활용한 결과이다. Fig. 6은 SPT-N값을 활용하여 작성된 액상화 재해도를 나타낸 그림으로 방법 A를 활용한 재해도와 전체적으로 유사한 분포도를 보이지만 재해도의 서쪽 부근에서 약간 큰 값을 나타냈다. SPT-N값을 활용한 경우 기지점 값으로 결정된 LPI값은 최솟값 0에서 최댓값 56.77 사이에 분포하는 것으로 결정되었으며 방법 A를 통해 결정된 계산 값보다 약간 큰 값을 나타냈다. 공간보간을 통해 예측된 LPI값은 최솟값 2.14에서 최댓값 26.33 사이에 분포하는 것으로 결정되어 방법 A를 통해 결정된 예측값보다 범위가 더 축소된 것으로 나타났다. 또한, 기지점 LPI값의 산술평균은 18.74, 예측된 LPI값의 산술평균은 17.15로 나타났으며 공간보간으로 예측된 값의 산술평균이 작게 나타난 것에 비해 전체 값의 범위는 공간보간으로 예측된 범위가 크게 줄어든 것으로 보아 공간보간된 LPI값이 전체적으로 밀집되어 분포

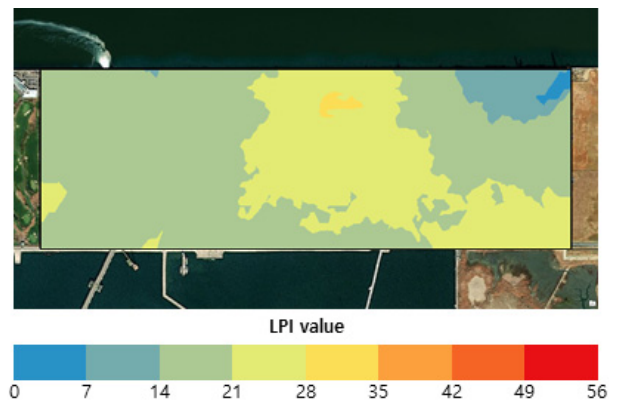


Fig. 6. Liquefaction hazard map using SPT-N value in method B

하는 경향을 나타내는 것으로 판단하였다.

Fig. 7은 V_s 값을 활용하여 작성된 액상화 재해도에 나타낸 그림으로 방법 A를 통해 작성된 재해도에 비해 LPI 값이 49~56에 해당하는 영역이 크게 늘어난 것으로 나타났다. V_s 값을 활용한 경우 기지점 값으로 결정된 LPI값은 최솟값 0에서 최댓값 98.74 사이에 분포하는 것으로 결정되어 Iwazaki et al.(1978)이 최초로 LPI의 개념을 제안할 당시의 LPI값의 범위로서 언급한 0~100에 근접한 범위를 갖고 분포하는 것으로 나타났다. 공간보간을 통해 예측된 LPI값은 최솟값 19.83에서 최댓값 54.41 사이에 분포하여 방법 A를 통해 예측된 값의 범위보다 축소된 범위를 갖고 분포하는 것으로 나타났다. V_s 값을 활용한 액상화 재해도 역시 SPT-N값을 활용한 재해도와 마찬가지로 공간보간된 LPI값이 전체적으로 밀집되어 분포하는 경향을 나타내며 예측값을 결정한다고 판단하였다. 기지점 LPI값의 산술평균은 43.21, 공간보간으로 예측된 값의 산술평균은 39.49로 공간보간을 통해 결정된 값이 더 낮아지는 경향을 나타냈다.

Fig. 8은 q_c 값을 활용하여 작성된 액상화 재해도를 나

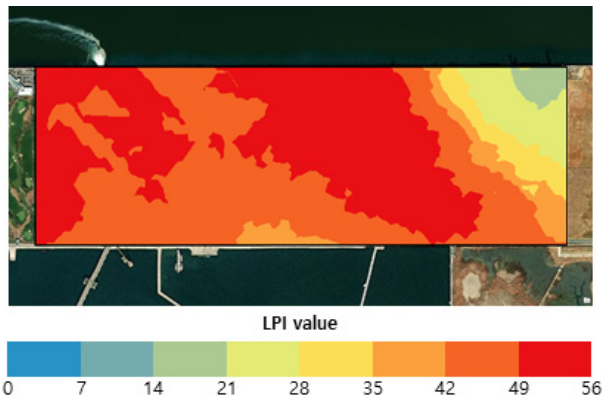


Fig. 7. Liquefaction hazard map using V_s value in method B

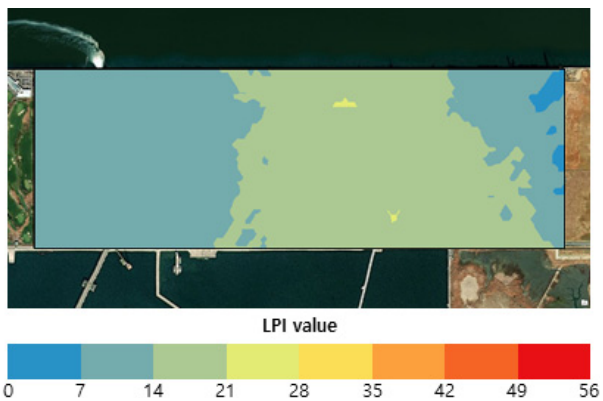


Fig. 8. Liquefaction hazard map using q_c value in method B

타낸 그림으로 방법 A를 통해 작성된 재해도에 비해 양 끝쪽에 해당하는 영역의 값이 전체적으로 크게 나타났다. q_c 값을 활용한 경우 기지점 값으로 결정된 LPI값은 최솟값 0에서 최댓값 54.91 사이에 분포하는 것으로 결정되어 방법 A를 통해 결정된 범위와 유사한 값으로 나타났다. 공간보간을 통해 예측된 LPI값은 최솟값 0에서 최댓값 22.31 사이에 분포하는 것으로 결정되었다. 이는 방법 A를 활용한 경우와 동일하게 지반정보에 따른 결과 중 기지점 값의 범위와 예측된 값의 범위가 가장 작게 차이나는 경우인 것으로 확인되었다. q_c 값을 활용한 경우 기지점 값의 산술평균이 11.14였으나 예측된 값의 산술평균이 10.29로 감소하여 방법 A를 활용한 경우와 다른 양상을 나타내었다.

4.3 액상화 재해도의 정밀도 비교

본 연구에서는 작성된 액상화 재해도의 정밀도를 RMSE 및 교차검증을 척도로 활용하여 비교하고자 하였으며 다음의 결과를 획득하였다. Table 4는 각 재해도의 RMSE를 나타낸 표이고 Fig. 9는 LPI값을 공간보간하는 방법 A로 결정된 액상화 재해도에 대해 교차검증을 수행한 결과를 나타낸 그림이며, Fig. 10은 방법 B의 재해도에 대한 교차검증 결과를 나타낸 그림이다. LPI를 공간보간하는 방법 A를 통해 액상화 재해도를 작성했을 때 RMSE값은 q_c 값을 활용한 경우가 6.68로 가장 정밀한 것으로 나타났으며, SPT-N값을 활용한 경우가 7.64, V_s 값을 활용한 경우가 10.18로 정밀도가 낮아지는 것으로 나타났다. 또한, 지반정보를 공간보간하는 방법 B를 통해 액상화 재해도를 작성했을 때 RMSE값은 q_c 값을 활용한 경우가 2.77, SPT-N값을 활용한 경우가 5.82, V_s 값을 활용한 경우가 9.40으로 나타났다. 이를 통해 본 연구에서 각 지반정보별 RMSE는 공간보간 대상과 관계없이 q_c 값을 활용한 경우 가장 높은 것을 확인하였고, 지반정보를 공간보간하는 방법 B를 활용한 경우의 정밀도가 높은 것을 확인하였다. 교차검증 결과 방법 A를

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

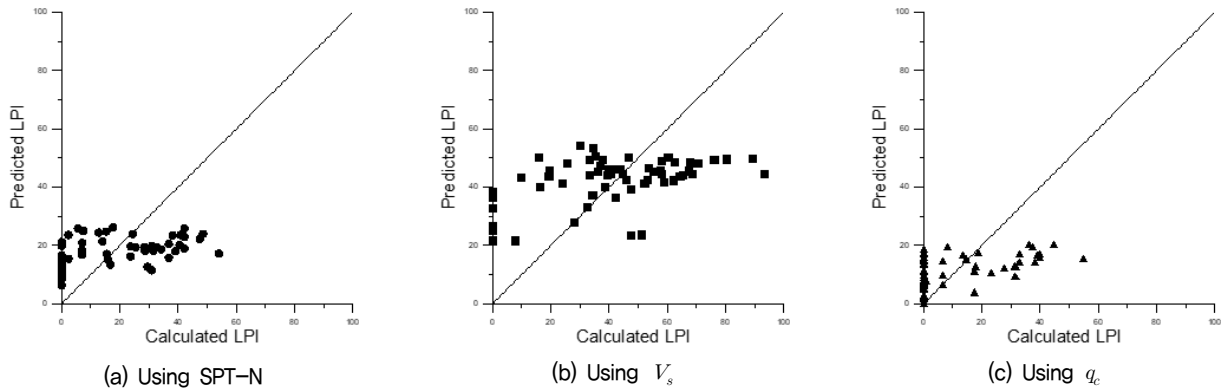


Fig. 9. Cross validation results of liquefaction hazard map in method A

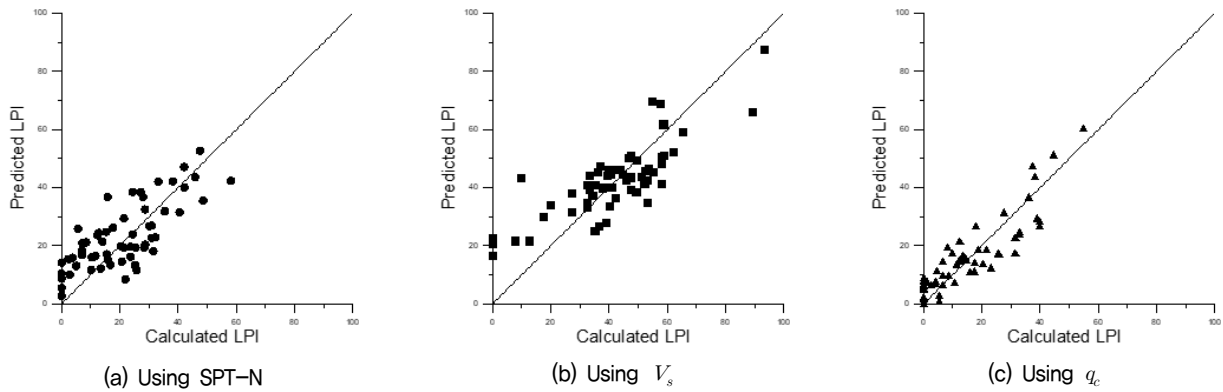


Fig. 10. Cross validation results of liquefaction hazard map in method B

활용한 결과는 세 가지 지반정보를 활용한 경우 모두 예측된 값에 비해 계산된 값에서 더 큰 분포를 나타냈으며 방법 B를 활용한 결과는 세 가지 지반정보를 활용한 경우 모두 1:1 line에 근접한 분포를 나타냈다. 이를 통해 방법 B를 활용한 경우의 정밀도가 높은 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 국내의 부지를 대상으로 하는 액상화 피해를 예측하고자 액상화에 저항하는 지층의 강도 개념인 CRR값을 결정하기 위해 활용되는 지반정보 및 액상화 재해도를 작성하기 위해 수행되는 공간보간 대상에 따라 액상화 재해도를 작성한 후 작성된 결과의 정밀도 변화를 비교하는 작업이 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 LPI를 공간보간 대상으로 하는 방법과 지반정보를 공간보간 대상으로 하는 방법에 대하여 각 방법 별로 SPT-N값 및 V_s 값, q_c 값을 활용하여

액상화 재해도를 작성하였고 교차검증 및 평균제곱근오차를 척도로 정밀도를 비교하였다.

(2) 공간보간 대상과 관계없이 액상화 재해도를 작성했을 때 RMSE값을 척도로 정밀도를 비교한 결과 q_c 값을 활용해 작성된 재해도의 정밀도가 가장 높았으며 SPT-N값을 활용한 재해도, V_s 값을 활용한 재해도 순서로 정밀도가 낮아지는 것으로 나타났다. 교차검증은 방법 A를 활용했을 때는 세 가지 경우 모두 예측된 값에 비해 계산된 값이 더 큰 분포를 나타냈으며 방법 B를 활용했을 때는 모두 1:1 line에 근접한 분포를 나타냈다.

(3) RMSE를 척도로 각 액상화 재해도의 정밀도를 비교하였을 때 두 가지 방법 모두 q_c 값을 이용한 경우가 가장 높은 정밀도를 보였고, SPT-N값, V_s 값 순서로 낮아지는 것을 확인하였다. 이를 통해 본 연구의 대상 지역에서는 q_c 값을 활용하여 액상화 재해도를 작성하는 것이 정밀도를 향상시키는 방안임을 확인하였다.

(4) RMSE를 활용한 정밀도를 비교하였을 때 지반정보를 공간보간하는 방법 B로 작성된 액상화 재해도의

정밀도가 활용된 지반정보와 관계없이 더 높은 것을 확인하였다. 또한 교차검증을 척도로 비교하였을 때 역시 방법 B로 작성된 액상화 재해도의 정밀도가 높은 것을 확인하였다. 따라서 본 연구의 대상 지역에서는 액상화 재해도를 작성할 경우 공간보간의 대상을 지반정보로 결정하는 것이 정밀도를 향상시키는 방안을 확인하였다.

본 연구에서 수행한 정밀도 분석 결과, q_c 값을 활용한 액상화 재해도의 정밀도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 이와 함께 q_c 값을 활용한 액상화 평가가 일반적으로 SPT-N값에 비해 더 정확한 것으로 알려져 있다. 그러나 지반정보 획득의 한계로 대부분의 액상화 재해도에는 SPT-N값이 사용되고 있는 실정이며, 이러한 한계점을 보완하기 위해 SPT-N을 보완한 q_c 기술의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

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.

참고문헌 (References)

1. Andrus, R.D. and Stokoe II, K.H. (2000), “Liquefaction Resistance of Soils from Shear-wave Velocity”, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.126, No.11, pp.1015-1025.
2. Baek, W. and Choi, J. (2019a), “Correlations of Arthquake Accelerations and LPIs for Liquefaction Risk Mapping in Seoul & Gyeonggi-do Area based on Artificial Scenarios”, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.20, No.5, pp.5-12.
3. Baek, W. and Choi, J. (2019b), “Seismic Risk Assessment on Buried Electric Power Tunnels with the Use of Liquefaction Hazard Map in Metropolitan Areas”, *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol.12, No.1, pp.45-56.
4. Baise, L.G., Higgins, R.B., and Brankman, C.M. (2006), “Liquefaction Hazard Mapping—Statistical and Spatial Characterization of Susceptible Units”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.6, pp.705-715.
5. Chiasson, P., Lafleur, J., Soulié, M., and Law, K.T. (1995), “Characterizing Spatial Variability of a Clay by Geostatistics”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32, No.1, pp.1-10.
6. Deutsch, C.V. (1996), “Correcting for Negative Weights in Ordinary Kriging”, *Computers and Geosciences*, Vol.22, No.7, pp.765-773.
7. 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.
8. Goovaerts, P. (1997), “Geostatistics for Natural Resources Evaluation”, Oxford University Press on Demand.
9. Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2008), “Soil Liquefaction during Earthquakes”, EERI: Earthquake Research Institute, Ca, USA.
10. Ishihara, K. (1985), “Stability of Natural Deposits during Earthquakes”, *In International conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol.11, pp.321-376.
11. 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.
12. Iwasaki, T., Tokida, K.I., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., and Sato, H. (1982), “Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods”, *Proceedings of the 3rd international conference on microzonation*, Seattle, Vol.3, No.2, pp.1310-1330.
13. Jaksa, M.B., Kaggwa, W.S., and Brooker, P.I. (1993), “Geostatistical Modelling of the Spatial Variation of the Shear Strength of a Stiff Overconsolidated Clay”, *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, pp.185-194.
14. Jung, J. and David, R.J. (2014), “Preparation of Probabilistic Liquefaction Hazard Map Using Liquefaction Potential Index”, *Journal of the Korea Society of Civil Engineering*, Vol.34, No.6, pp.1831-1836.
15. 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.
16. Kang, G.J., Park, I.J., and Kim, S.I. (2000), “Study on Mapping of Liquefaction Hazard Potential at Port and Harbor in Korea”, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.4, No.2, pp.57-64.
17. Kim, I.K., Sung, W.M., and Jung, M.Y. (1993), “Development and Validation of Multi-purpose Geostatistical Model with Modified Kriging Method”, *Economic and Environmental Geology*, Vol.26, No.2, pp.207-215.
18. Luna, R. and Frost, J.D. (1998), “Spatial Liquefaction Analysis System”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.12, No.1, pp.48-56.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F.J., 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.

23. Seo, M.W., Sun, C.G., and Oh, M.H. (2009), "LPI-based Assessment of Liquefaction Potential on the West Coastal Region of Korea", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 3, No.4, pp.1-13.
24. 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.817-33.

Received : June 28th, 2021

Revised : January 17th, 2022

Accepted : January 17th, 2022