

# 개정된 지반증폭계수의 Macro적 액상화 평가에 미치는 영향 분석

## Analysis of the Effect of the Revised Ground Amplification Factor on the Macro Liquefaction Assessment Method

백 우 현<sup>1</sup> Baek, Woo-Hyun

최 재 순<sup>2</sup> Choi, Jae-Soon

### Abstract

The liquefaction phenomenon that occurred during the Pohang earthquake ( $M_L=5.4$ ) brought new awareness to the people about the risk of liquefaction caused by the earthquake. Liquefaction hazard maps with 2 km grid made in 2014 used more than 100,000 borehole data for the whole country, and regions without soil investigation data were produced using interpolation. In the mapping of macro liquefaction hazard for the whole country, the site amplification effect and the ground water level 0 m were considered. Recently, the Ministry of Public Administration and Security (2018) published a new site classification method and amplification coefficient of the common standard for seismic design. Therefore, it is necessary to rewrite the liquefaction hazard map reflecting the revised amplification coefficient. In this study, the results of site classification according to the average shear wave velocity in soils before and after revision were compared in the whole country. Also, liquefaction assessment results were compared in Gangseo-gu, Busan. At this time, two ground accelerations corresponding to the 500 and 1,000 years of return period and two ground water table, 5 m for the average condition and 0 m the extreme condition were applied. In the drawing of liquefaction hazard map, a 500 m grid was applied to secure a resolution higher than the previous 2 km grid. As a result, the ground conditions that were classified as  $S_C$  and  $S_D$  grounds based on the existing site classification standard were reclassified as  $S_2$ ,  $S_3$ , and  $S_4$  through the revised site classification standard. Also, the result of the Liquefaction assessments with a return period of 500 years and 1,000 years resulted in a relatively overestimation of the LPI applied with the ground amplification factor before revision. And the results of this study have a great influence on the liquefaction assessment, which is the basis of the creation of the regional liquefaction hazard map using the amplification factor.

### 요 지

포항지진( $M_L=5.4$ ) 시 발생한 액상화 현상은 국민들에게 지진으로 유발되는 액상화의 위험성을 새롭게 각인시켰고, 이에 대한 대비책으로 액상화 위험지도의 관심이 높아지고 있다. 현재 행정안전부가 보유하고 있는 액상화 위험지도는 2014년 제작된 것으로 전국 100,000개 이상의 시추 자료를 토대로 지하수위 0m인 조건으로 지반조건별 증폭계수를 사용하였으며 시추정보가 없는 지역은 보간법을 이용하여  $2\text{km} \times 2\text{km}$  격자형식으로 제작된 것이 특징이다. 이러한 가운데, 2018년 행정안전부는 내진설계 공통기준의 새로운 지반분류법과 증폭계수를 공표하였다. 따라서 개정된 행정

1 비회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Construction System Engrg., Seoul National Univ. of Science & Technology)  
2 정회원, 서경대학교 토목건축공학과 부교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Architecture Engrg., Seokyeong Univ., Tel: +82-02-940-7771, Fax: +82-02-940-7105, geotech@skuniv.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

안전부의 증폭계수를 반영한 액상화 위험지도의 재작성이 필요하다. 본 연구는 내진설계 공통기준 개정 전·후 두 개의 기준으로 전 국토를 대상으로 지반분류를 수행하여 변동성을 분석하였으며, 지반조건별 증폭계수를 적용한 액상화 평가결과를 부산시 강서구를 대상으로 수행하였다. 이때 재현주기 500년과 1,000년에 해당하는 지반가속도를 적용하였으며 우리나라 평균 지하수위인 5m와 극한 조건인 0m로 구분하여 액상화 위험도를 평가하였다. 액상화 위험지도는 기존의 2km × 2km보다 높은 해상도를 확보하기 위해 500m × 500m 격자를 생성하여 위험지도를 작성하였다. 연구결과, 기존 지반분류 기준을 통해 S<sub>C</sub>, S<sub>D</sub> 지반으로 분류되었던 지반상태가 개정된 지반분류 기준을 통해 S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>로 재분류되었다. 재현주기 500년과 1,000년으로 액상화 평가를 수행한 결과 개정 전 지반증폭계수 적용한 LPI가 상대적으로 과대평가되는 결과를 도출하였다. 본 연구결과는 증폭계수를 이용하는 광역지역 액상화 위험지도 작성의 근간인 액상화 평가에 큰 영향을 미치는 요소로써 향후 광역지역 액상화 위험지도 작성의 경우 반드시 고려될 사항으로 판단된다.

**Keywords :** Liquefaction hazard map, Liquefaction potential index, Macro liquefaction assessment, Site amplification, Soil classification

## 1. 서 론

2016년 9월 12일 발생한 경주지진( $M_L=5.8$ )과 2017년 11월 15일 발생한 포항지진( $M_L=5.4$ )은 인명피해와 경제적 손실뿐만 아니라 국민들에게 지진에 대한 불안감을 야기시켰다. 연이은 지진 발생 직후 정부는 국가적 차원의 내진설계기준 재정비와 지방정부 차원의 지진에 대한 대비·대응책 마련 방안 등 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다.

국내 지진 및 내진설계 연구는 1997년 상위개념인 내진설계기준연구(II)를 건설교통부 주축으로 제정하며 연구가 활발하게 진행되었다. 하지만 당시 필수적 사전 검토 과정인 지반조건에 따른 증폭특성의 정량적 평가 없이 국가적 내진 대책의 조속한 체계화를 위해 미국 서부의 지반조건별 증폭계수를 준용하였으며(Kim et al., 2002; Sun et al., 2005), 기반암이 주로 30m 이내에 존재하는 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있다는 연구결과들이(Yoon et al., 2006; Kim et al., 2008) 선행 연구를 통해 도출되었다.

2018년 행정안전부가 개정한 내진설계기준 공통적용사항의 내용은 1990년 후반부터 활발하게 진행된 선행 연구들(Kim et al., 2008; Cho et al., 2016)의 결과로써 국내 지진특성 및 국내 지반 환경적 요인들이 반영되어 기반암 심도 20m를 기준으로 지반조건이 분류되고 그에 따른 지반조건별 단주기, 장주기 증폭계수 산정 등이 반영된 것이 특징이다.

국외 액상화 위험지도 작성 연구의 경우, 대규모 지

진이 자주 발생하는 일본, 미국, 뉴질랜드 등의 국가기관에서 활발하게 연구를 진행하고 있다. 미국의 USGS는 지질도 및 지구 물리 데이터 등을 기반으로 액상화 발생 가능성 구역 및 지진으로 발생할 가능성이 높은 산사태 위험 구역 등 지진위험 지역을 평가하여 지자체에서 배포하고 있으며, 일본의 경우, 2012년 10월 발표한 요코하마시 지진 피해 추정조사 보고서에서 예정된 3개의 지진 규모에 따라 50m 격자 단위로 액상화 위험지도를 작성하여 액상화 위험등급이 높은 지역의 경우 향후 액상화 대책에 따라 개별적 지반조사를 권장하는 액상화 지도 작성이 진행된 바 있다. 뉴질랜드의 경우 침하량을 기준으로 액상화 평가를 수행하는 LSN(Liquefaction Severity Index)지수를 제안하고 LSN과 LPI, 침하량 등의 액상화 위험지도를 작성한 후 비교 분석한 연구(Van et al., 2013)사례가 있다.

국내 액상화 위험지도 연구의 경우, 서울을 대상 지역으로 재현주기 500년, 1,000년과 2,400년에 해당하는 지진가속도(0.11g, 0.154g, 0.22g)를 적용하여 지진응답 해석을 이용한 LPI 액상화 위험지도와 지반증폭계수를 이용한 LPI 액상화 위험지도를 비교·분석하여 액상화 위험지도 작성 시 지반증폭계수 적용의 타당성을 증명한 사례(Kwak et al., 2015)가 있으며, 이는 이전의 여러 연구(Kwak, 2001; Ku, 2010; Baek, 2014; Choi et al., 2014; Baek et al., 2015)연속이며, 최근 들어 액상화 위험지도에 대한 많은 연구(Baek et al., 2018; Ahn et al., 2018)가 진행되고 있다. 특히, 지반조건별 증폭계수를 적용한 Macro적 액상화 평가법으로 다양한 가속도를 적

용하여 포항시 액상화 위험도 평가한 연구를 통해 0.10g 이상의 지반가속도에서 실제 포항지진으로 발생한 액상화 의심지역인 흥해읍과 송도동 주변의 액상화 발생 가능성이 높다는 결과를 예측한 바 있다(Baek et al., 2018). 또한, 2015년 국가재난 안전관리시스템 내에 액상화 위험지도가 탑재되었으며, 이는 전국을 2km×2km 격자로 표현한 수치지도 상에 지반조사자료를 토대로 지반분류를 수행하고 다양한 지진가속도와 지반조건별 증폭계수를 적용하여 각 격자의 액상화 위험도를 표현한 것이다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 2018년 내진설계 공통적용사항에 지반분류와 지반증폭계수 부분의 개정이 포함되었으므로 기존의 액상화 위험지도에 대한 보완이 필요하다.

본 연구는 개정된 지반조건별 증폭계수 적용의 타당성 검증과 Macro적 액상화 평가에 미치는 영향 분석을 위하여 전국 120,000개의 시추공 정보를 이용하여 내진설계기준 공통적용사항 개정 전후의 지반분류를 비교·분석하고 부산시 강서구를 대상으로 우리나라 평균 지하수위인 5m와 극한상황인 0m의 경우로 가정하여 액상화 위험지도를 작성하였다. 이때 재현주기 500년과 1,000년에 해당하는 지반가속도 0.11g과 0.154g을 적용하였으며 전국은 물론, 시군 단위에서의 해상도를 고려하여 2km × 2km 격자형식이 아닌 500m × 500m 격자형식을 적용하였다.

## 2. 연구절차 및 평가방법

### 2.1 연구절차

본 연구에서는 행정안전부가 2018년 새롭게 공표한

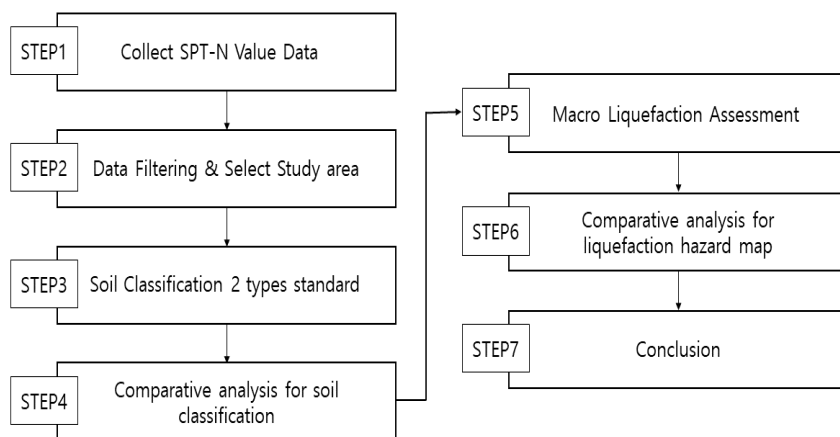


Fig. 1. The procedure of the study

내진설계기준 공통적용사항에 수록된 지반분류체계와 지반조건별 증폭계수를 이용하는 Macro적 액상화 평가법의 타당성을 검증하고자 하며 연구절차는 Fig. 1과 같다.

### 2.2 Macro적 액상화 평가법

Fig. 1의 Step 5에 해당하는 Macro적 액상화 평가 후 내진설계기준 개정 전·후의 액상화 위험도를 파악하기 위해 액상화 발생가능성 지수(Liquefaction potential index: LPI)를 산정하였으며 Iwasaki가 제안한 경험식 (1)을 이용하였다.

$$P_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \quad (1)$$

여기서  $z$ 는 깊이,  $w(z)$ 는 액상화 발생 깊이를 고려하기 위한 가중치함수 [ $w(z) = 10 - 0.5z$ ], 그리고  $F(z)$ 는 각 깊이에서의 액상화에 대한 안전율(Safety Factor:SF)이며 이는 지진에 의한 전단응력비(Cycle Stress Ratio; CSR)를 지반의 액상화 저항응력비(Cycle Resistance Ratio; CRR)로 나눈 값을 의미한다. 이때, 액상화 평가안전율이 기준 안전율 1보다 작은 경우에는  $F(z) = 1 - SF$ 로 정의되며 안전율이 1보다 클 경우에는  $F(z) = 0$ 이다. 액상화에 대한 지반의 저항력인 CRR 산정은 표준관입시험 SPT N치를 이용하여 산정한다. 또한 CRR은 세립질 함유량이 증가함에 따라 그 값이 증가한다(Seed et al., 1985). 지반의 CRR 산정에 사용된 식은 (2)와 같으며 여기서 산정된 CRR은 지진규모 7.5에 대한 값이다.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (2)$$

경험식 (2)에서  $(N_1)_{60}$ 은 SPT-N시험시 에너지효율 60% 기준으로 환산한 값이며 이때,  $(N_1)_{60}$ 으로 환산하는 방법은 경험식 (3)과 같다.

$$(N_1)_{60} = N C_N C_E C_B C_R C_S \quad (3)$$

여기서 N은 측정된 SPT-N값,  $C_N$ 은 상재하중에 대한 보정값이며,  $C_E$ 는 해머의 에너지 효율에 대한 보정,  $C_B$ 는 굴착할 직경에 대한 보정,  $C_R$ 은 룯드 길이에 대한 보정,  $C_S$ 는 샘플러 종류에 대한 보정이다. 지반조사결과를 토대로 액상화 평가 후 생략지반으로 판정된 경우에는 LPI값을 0으로 간주하였다. 지진에 의한 전단응력비, CSR은 지반분류에 따라 지반증폭계수와 지진가속도를 적용하여 산정하거나 지진응답해석을 통해 산정하는 방법이 있다. 본 연구에서 다루는 광역지역의 경우에는 지반분류를 통해 지진가속도와 지반증폭계수를 적용하는 것이 합리적이며 이를 고려한 식은 경험식 (4)와 같으며 이는 Eurocode-8(2004)에서 사용하고 있는 식이다.

$$CSR = \frac{(\tau_d)_{\max}}{\sigma'_v} = 0.65 \times \frac{a_{bedrock} \times S}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (4)$$

$\sigma_v$ ,  $\sigma'_v$ 는 연직전응력과 연직유효응력이고,  $(\tau_d)_{\max}$ 는 최대전단응력,  $a_{bedrock}$ 은 기반암 지반가속도를 말하며 S는 지반조건별 증폭계수이다. 경험식 (2)는 강진 국가의 지진규모 7.5를 고려한 값으로 이를 중진 지역의 우리나라 설계지진규모 6.5에 맞추려면 이에 대한 보정계수 (Magnitude Scaling Factor: MSF)가 필요하다. 이를 고

Table 1. Level of liquefaction damage by LPI (Iwasaki et al., 1982)

| LPI                | Level of liquefaction damage |
|--------------------|------------------------------|
| 0                  | No damage                    |
| $0 < LPI \leq 5$   | Minor damage                 |
| $5 < LPI \leq 15$  | Medium damage                |
| $15 < LPI \leq 25$ | High damage                  |
| $25 < LPI$         | Extensive damage             |

려한 최종 액상화 안전율 산정식은 식 (5)와 같다.

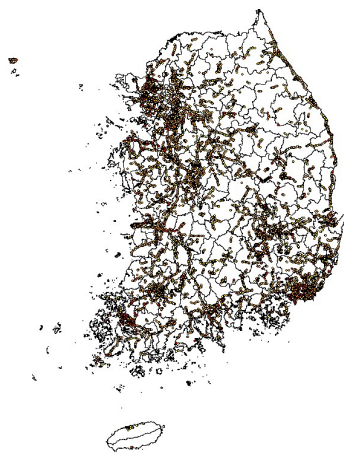
$$SF_{Final(M=6.5)} = (CSR/CRR) MSF \quad (5)$$

경험식 (5)에서 MSF 값은 1.5이며 경험식 (5)를 이용하여 산정된 안전율을 식 경험식 (1)에 대입하여 최종 LPI를 산정한다. 본 연구에서는 63개의 액상화 발생지역과 22개의 액상화 미발생 지역을 대상으로 하여 LPI값에 따른 액상화 피해정도와의 상관관계를 제안한 Iwasaki의 Table 1의 피해범주를 적용하였다.

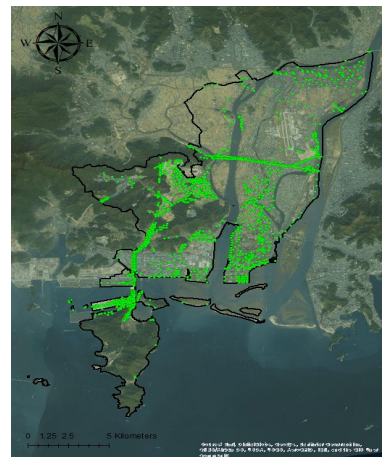
### 3. 대상지역 선정 및 지반분류 분석

#### 3.1 대상지역 선정 및 지반자료 검증

본 연구에서는 우리나라 지반의 분류상태를 검토하기 위해 국토지반정보 통합DB센터의 전국 지반조사자료 약 138,000개를 활용하였으며, 이중 입력 좌표의 오류, 누락된 자료의 삭제 작업 등 자체 데이터 필터링 과정을 통하여 최종적으로 약 122,000개의 SPT-N치 자료



(a) soil classification study area



(b) Liquefaction assessment study area

Fig. 2. Location of study area

를 이용하여 지반분류를 수행하였다. 지반분류 대상지역은 전국의 지반조사자료로 선정하였으며 지반분류 대상지역과 시추공 위치자료는 Fig. 2(a)와 같다.

지반분류를 통한 개정 전후의 지반분류 분석 후 지반조건별 증폭계수를 이용하는 Macro적 액상화 평가를 수행하였다. 획득한 SPT-N치 자료는 국토지반정보 통합DB센터의 연구수행 중 획득한 지반조사자료이며 신뢰성 검증 및 DB표준화 작업 QC Filtering 기법(Gang et al., 2019)을 통한 데이터 검증으로 최적화된 지반조사자료 1,186개를 이용하고자 대상지역을 부산시 강서구로 선정하였다.

대상지역과 사용한 시추조사자료의 위치는 Fig. 2(b)와 같다.

### 3.2 지반분류 방법

Fig. 1 Step 3에 해당하는 지반조건별 증폭계수를 이용하는 Macro적 액상화 평가법을 수행하기 위해서는 지반분류가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 전국의 시추조사자료를 이용하여 내진설계 기준 공통 적용사항 개정 전·후의 지반분류체계를 모두 적용하여 비교·분석하였다. 이때 1997년 건설교통부가 제정한 내진설계 기준의 지반분류와 그에 따른 지반 증폭계수는 미국 서부 지역의 기준(Kim et al., 2002; Baek et al., 2015)을 준용한 것으로 단주기와 중장주기에 관한 두 종류의 지반증폭 계수들을 30m 심도까지의 평균 전단파속도라는 기준에 따라 S<sub>A</sub>, S<sub>B</sub>, S<sub>C</sub>, S<sub>D</sub>, S<sub>E</sub> 다섯 종류로 지반을 분류하게 되며 지반특성이 지진공학적으로 매우 불리한 경우에는 추가적인 부지특성 평가가 요구되는 S<sub>F</sub>로 분류하게 된다.

이에 반해, 개정된 행정안전부의 내진설계 기준의 지반분류기준은 비교적 기반암 심도가 얇은 국내 지반 환경적 요인을 고려하여 기반암 심도 20m를 이하와 초과하는 기준을 마련하고 그에 따른 평균 전단파속도로 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub> 다섯 종류로 분류하며 기존의 S<sub>F</sub>로 분류한 경우는 S<sub>6</sub> 지반으로 분류하게 된다. 이상의 내용을 요약·정리하면 Table 2와 같다.

국내의 경우, 현장실험 및 실내실험을 통한 전단파속도, V<sub>s</sub>를 획득하기 위한 자료가 미비한 실정이며 이러한 경우, 표준관입시험 관입저항지(SPT-N치)를 전단파속도로 변환하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 Sun et al.(2005)이 제안한 식 (6)을 사용하였다.

$$V_s = 65.64N^{0.407} \quad (6)$$

여기서 N은 표준관입시험(Standard Penetration Test; SPT)시 30cm 관입에 필요한 타격횟수이다.

### 3.3 지반분류 분석

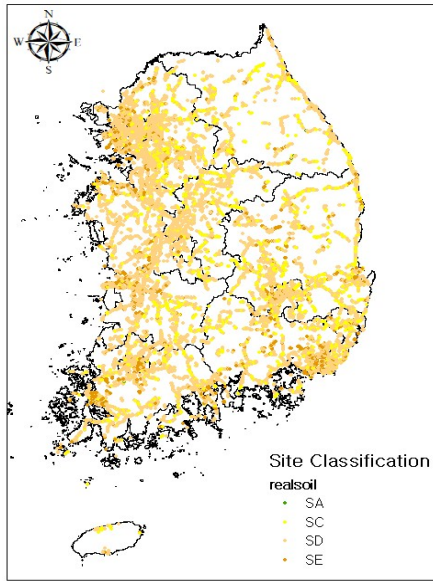
본 연구에서는 전국을 대상으로 내진설계기준 공통 적용사항 개정 전·후 기준으로 지반분류를 수행하였다. 또한, 분류결과는 ArcGis10.1 프로그램을 이용하여 수치지도로 나타냈으며 그 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3은 지반기준체계를 변경하기 전·후의 지반분류를 나타내고 있으며, Fig. 3에서 알 수 있듯이 기존 건설교통부 내진설계기준은 대다수의 지반이 S<sub>C</sub>와 S<sub>D</sub> 지반으로 분류되고 개정 후 기준으로 지반분류 수행결과 S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>로 재분류된 것을 확인할 수 있다.

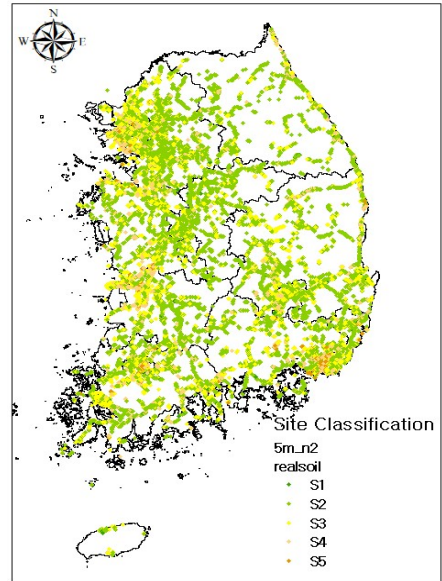
총 12만 2천여개의 시추조사자료를 분석한 결과, 1997

Table 2. Soil classification and amplification factor

| Ministry of construction and Transportation (1997) |                               |                                    |                           | Ministry of the interior and safety (2018) |                        |        |                |  |
|--|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------|--|------------------------|--------|----------------|--|
| Soil type  | Soil classification           | Shear wave velocity V <sub>s</sub> | Amplification coefficient | Soil type                                  | Soil classification    |        |                | Amplification coefficient<br>F <sub>a</sub><br>S ≤ 0.2 |
|  |                               |                                    |                           |  |                        | Depth  | V <sub>s</sub> |  |
| S <sub>A</sub>                                     | Hard rock                     | >1500                              | -                         | S <sub>1</sub>                             | Hard rock              | < 1    | -              |  |
| S <sub>B</sub>                                     | Rock                          | >760                               | 1.00                      | S <sub>2</sub>                             | Shallow & Hard         | 1 ≤ 20 | ≥ 260          | 1.4  |
| S <sub>C</sub>                                     | Very dense soil and soft rock | >360                               | 1.18                      | S <sub>3</sub>                             | Shallow & Soft         |        | < 260          | 1.5  |
| S <sub>D</sub>                                     | Stiff soil                    | >180                               | 1.45                      | S <sub>4</sub>                             | Deep & Hard            | > 20   | ≥ 180          | 1.4  |
| S <sub>E</sub>                                     | Soft soil                     | ≤ 180                              | 2.00                      | S <sub>5</sub>                             | Deep & Soft            |        | < 180          | 1.3  |
| S <sub>0</sub>                                     | Site specific analysis        |                                    |                           | S <sub>6</sub>                             | Site specific analysis |        |                |  |



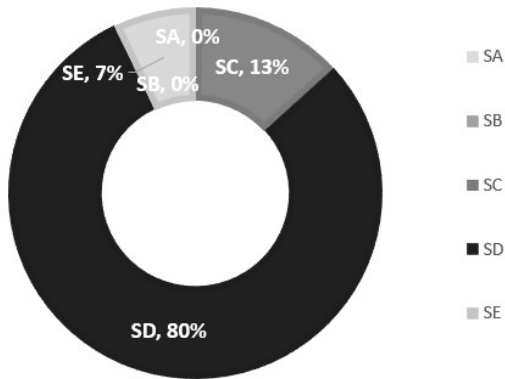
(a) Ministry of construction and Transportation (1997)



(b) Ministry of the interior and safety (2018)

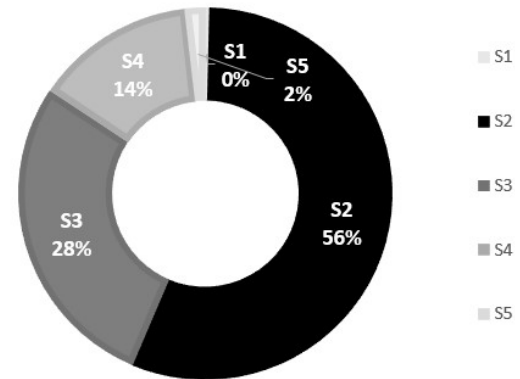
Fig. 3. Mapping result of 2 types of site classification

**SITE CLASSIFICATION OF 1997 STANDARD**



(a) Ministry of construction & Transportation (1997)

**SITE CLASSIFICATION OF 2018 STANDARD**



(b) Ministry of the interior and safety (2018)

Fig. 4. Result of 2 types of Site Classification

년 건설교통부의 지반분류기준으로 지반분류 수행한 결과는 약 80%에 해당하는 지반이 S<sub>D</sub>로 분류되었고 S<sub>C</sub> 13%, S<sub>E</sub> 7% 분류되었으며 이에 반해 개정된 행정안전부 지반분류체계 기준으로 분류한 결과는 S<sub>2</sub> 56%로 대부분 분류되었으며, S<sub>3</sub> 28%, S<sub>4</sub> 14%, S<sub>5</sub> 2%로 분류되었다. 이를 정리하면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4(a)를 보면, 전 지반분류 기준의 경우 대부분 지반이 S<sub>D</sub> 지반으로 분류되었다. 이것은 지반분류시 기초자료인 표준관입시험데이터를 기반으로 향타 횟수가 종료된 시점을 기반암으로 가정하고 지반분류를 수행하였기 때문이다.

**RECLASSIFIED RESULT OF GROUND CLASSIFICATION**

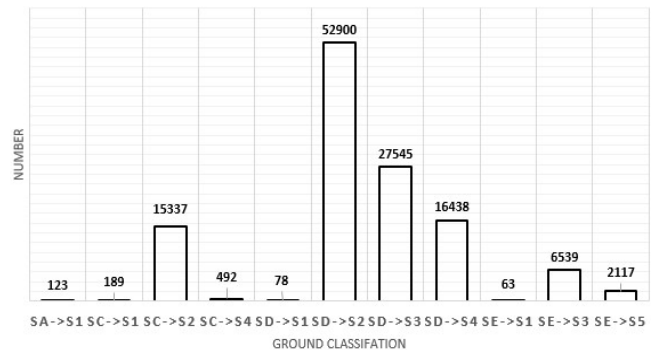


Fig. 5. Result of Changing soil classification analysis

또한, 개정 전후의 지반분류가 어떤 변화가 있는지를 각 지반종류에 따라 상세하게 분석한 결과, Fig. 5와 같이 나타났다.

Fig. 5를 보면, S<sub>C</sub>지반은 S<sub>2</sub>, S<sub>E</sub>지반은 S<sub>3</sub>로 재분류되는 경우가 가장 많았으며 우리나라 지반의 대부분을 차지하는 S<sub>D</sub>지반의 경우, 43%에 해당하는 52,900개의 지반이 S<sub>2</sub>로, 23%에 해당하는 27,545개의 지반이 S<sub>3</sub>로, 그리고, 14%에 해당하는 16,438개의 지반이 S<sub>4</sub> 지반으로 재분류되었다.

#### 4. 액상화 평가 및 위험지도 비교

##### 4.1 액상화 평가

본 연구에서는 앞선 분석을 통해 나타난 지반증폭계수의 개정이 Macro적 액상화 평가에 미치는 영향을 분석하기 위해 각 지반조사자료를 토대로 액상화 평가를 수행하고 이를 통해 500m×500m 격자를 기준으로 한 액상화 발생가능성지수를 산정하고 이를 수치지도에 도시하였다. 격자형식 액상화 위험지도는 각 격자의 대푯값을 선정하는 의사결정이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 시추공을 기반으로 액상화 평가를 수행한 후 데이터가 없는 지역의 경우 가까이 있는 실측 값에 더 큰 가중 값을 주어 보간하는 방법인 IDW(Inverse Distance Weighted) 보간기법을 적용하여 위험지도를 작성하고

이를 격자 내 LPI값이 최대인 경우와 평균값을 비교하였으며 이를 함께 나타내면 Fig. 6과 같다.

분석 결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이 대푯값을 평균으로 선정하였을 경우가 시추공 기반의 IDW 보간기법을 적용한 위험지도와 유사한 것으로 나타났다.

##### 4.2 액상화 위험지도 비교

지반종류 및 연계된 지반증폭계수의 변화가 Macro 액상화 위험지도 작성에 어떤 영향을 주는가를 분석하기 위해 실제 부산시 강서구를 대상으로 액상화 평가를 수행하고 액상화 위험지도를 작성하였다. 이때, 지진가속도는 붕괴방지 2등급과 1등급에 해당되는 재현주기 500년의 0.11g과 1000년의 0.154g을 각각 적용하였다.

또한, 액상화 평가시 주요한 지표인 지하수위의 상대적 분석을 위하여 극한상태인 0m의 경우와 평균 지하수위인 5m의 경우를 비교·분석하였다. 극한상태인 0m는 집중호우 및 태풍 등으로 인해 지하수위가 지표까지 상승하여 토층 전체가 포화된 경우를 고려한 것이다. 이상의 내용과 같이 각각의 경우에 대해 개정 전후의 LPI값으로 표현된 액상화 위험지도를 나타내면 Fig. 7에서부터 Fig. 10과 같다.

Fig. 7과 Fig. 8의 개정 전 액상화 위험지도와 개정 후 액상화 위험지도를 분석해보면 평균 지하수위인 5m의 경우, 재현주기 500년, 1,000년 모두 대상 지역 북동

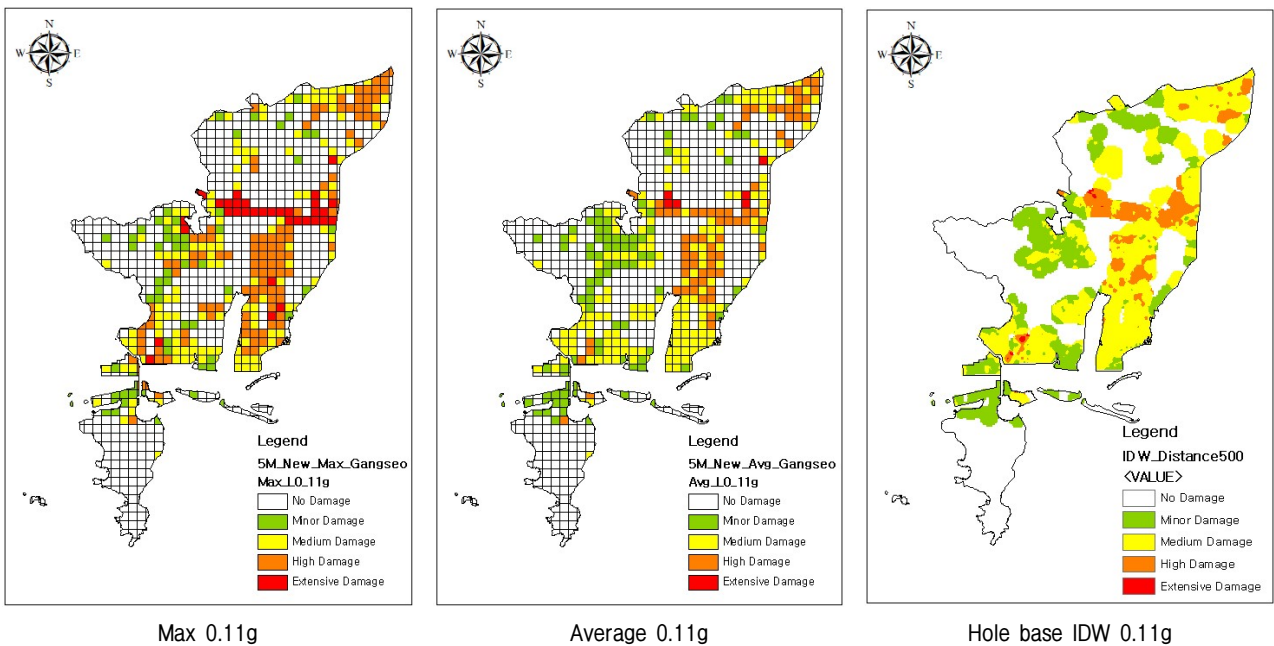
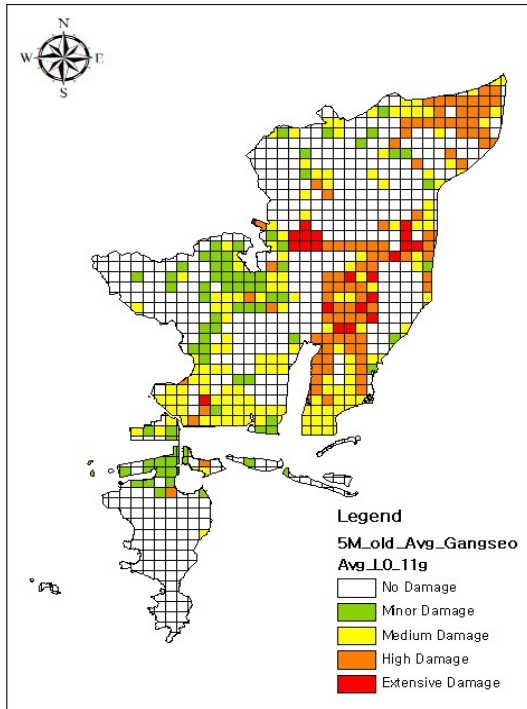
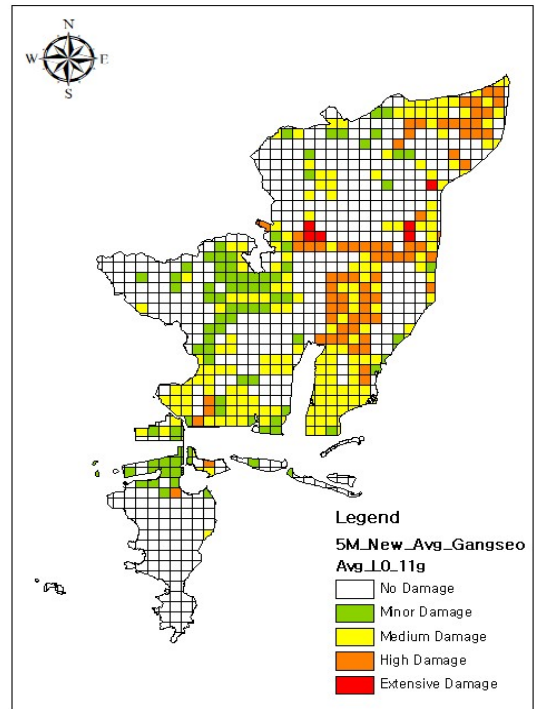


Fig. 6. Decision to Select representative value

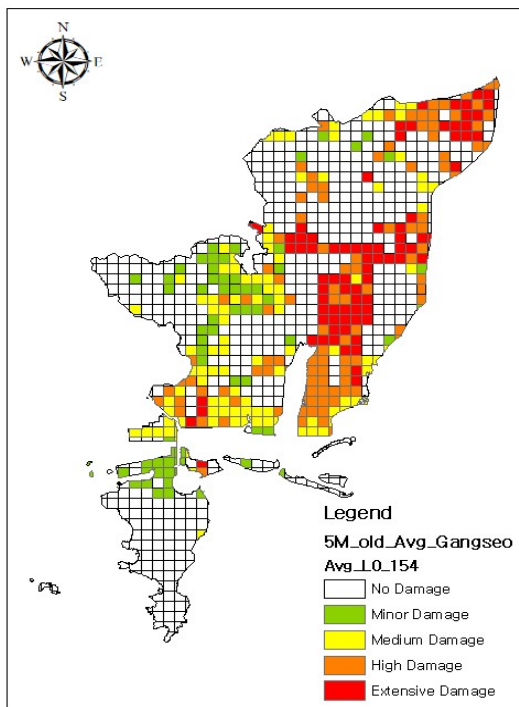


(a) Ministry of construction & Transportation (1997)

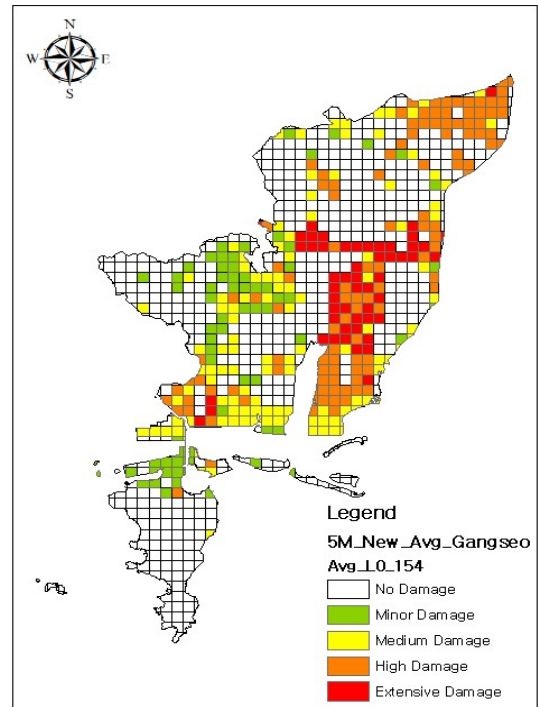


(b) Ministry of the interior and safety (2018)

Fig. 7. 500 years of return period Liquefaction hazard map (Groundwater level 5M)



(a) Ministry of construction & Transportation (1997)



(b) Ministry of the interior and safety (2018)

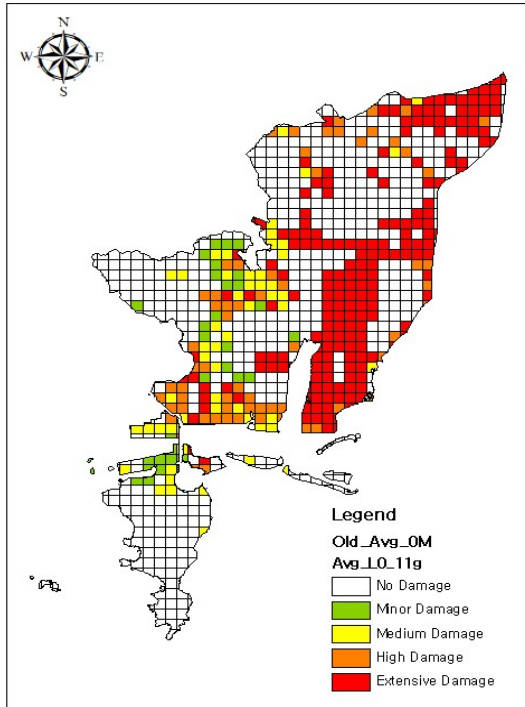
Fig. 8. 1,000 years of return period Liquefaction hazard map (Groundwater level 5M)

쪽과 중심지역에서 LPI 등급이 변화된 것을 볼 수 있다. 그러나, 지하수위가 0m인 경우에는 개정전·후 모두 액상화 발생가능성이 높게 예측되어 개정 전후의 변화가

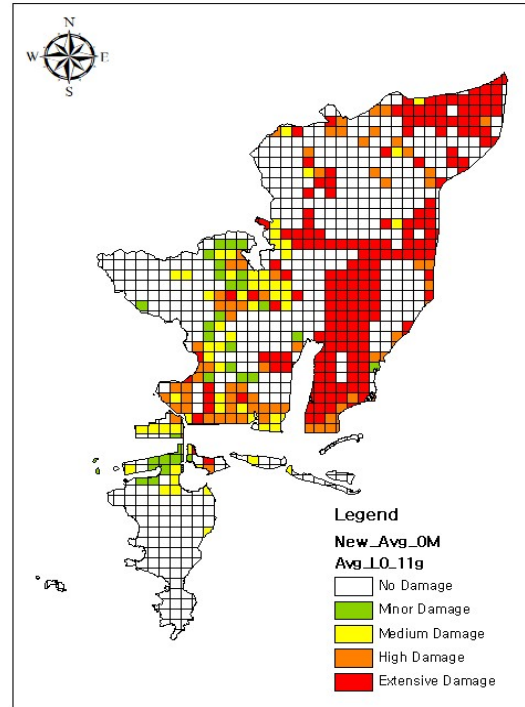
크지 않은 것으로 나타났다.

변화형태를 정량적으로 분석하기 위해 전체 셀의 LPI 값을 상세분석하였으며 이를 정리하여 나타내면 Fig.



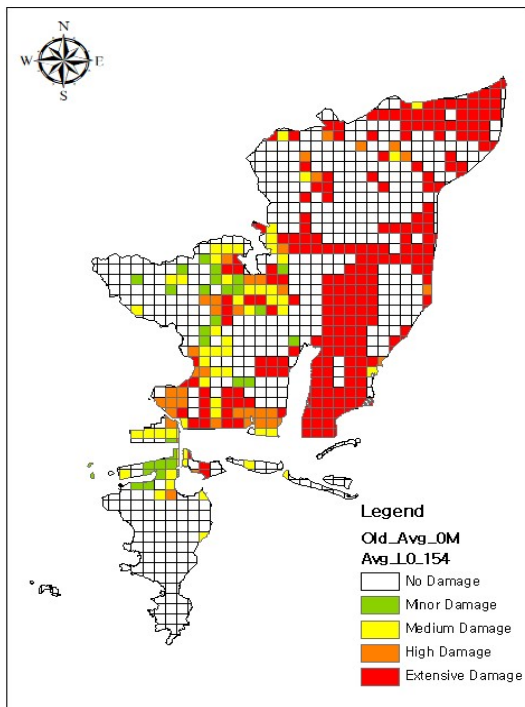


(a) Ministry of construction & Transportation (1997)

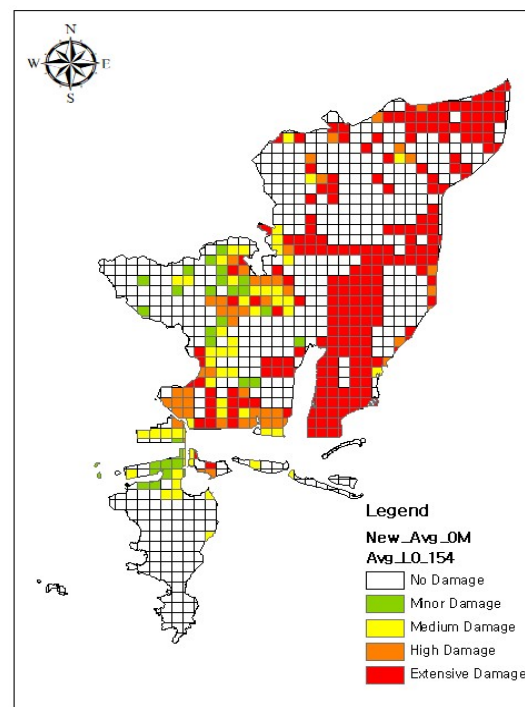


(b) Ministry of the interior and safety (2018)

Fig. 9. 500 years of return period Liquefaction hazard map (Groundwater level 0M)



(a) Ministry of construction & Transportation (1997)



(b) Ministry of the interior and safety (2018)

Fig. 10. 1,000 years of return period Liquefaction hazard map (Groundwater level 0M)

11과 같다. 이때, Table 1에 나타난 바와 같이 LPI 5를 기준으로 액상화 발생가능성이 작고 높음을 나누는 점을 고려하여 5 이하인 경우와 5 초과인 경우로 구분하

여 나타내었다.

Fig. 11을 보면, 전반적으로 개정 후의 경우가 LPI값을 상대적으로 적게 산정하는 것으로 나타났다. 이상으

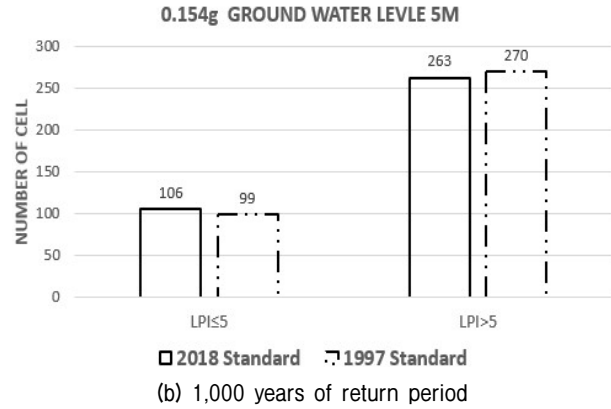
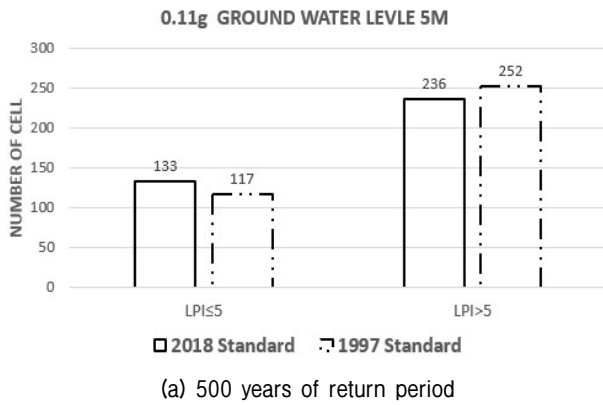


Fig. 11. Analysis of LPI level changes of two standards

로부터 지반조건별 증폭계수를 사용하는 Macro 액상화 위험지도의 경우, 지반을 한 가지의 특성으로 파악함으로써 지진응답해석을 이용한 LPI 산정결과보다 과대에 측하는 경향을 보인다는 기존의 연구결과(Ahn et al., 2018)를 일정 부분 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 2018년 공표된 내진설계기준 공통적 용사항 내 지반분류와 지반종류에 따른 지반증폭계수에 대한 개정이 Macro적 액상화 위험지도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 전국의 시추조사자료 약 12만2천여개의 정보를 바탕으로 지반분류를 우선적으로 수행하였다. 또한, 부산 강서구 지역을 대상으로 개정 전·후 지반분류체계 기준으로 지반조건별 증폭계수를 이용하는 액상화 평가를 수행하고 액상화 위험지도를 작성하여 비교·분석하였다. 이때, 액상화 위험지도는 지하수위 0m, 5m인 경우와 재현주기 500년, 1,000년의 경우로 구분하여 작성하였다. 특히, 액상화 위험도 지도를 작성하기 전, Macro적 위험지도를 구성하는 격자 내부의 대푯값 선정에 대한 적용성 검토를 우선 수행하였으며 본 연구를 수행하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 개정 전·후 지반분류체계 기준으로 지반분류를 수행한 결과 기존 지반분류체계의 경우 대다수의 시추조사자료 정보가 S<sub>C</sub>, S<sub>D</sub> 지반으로 분류되었으며, 개정 후 지반분류체계 적용시 S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub> 지반으로 재분류 됨을 확인하였다. 또한, 개정 전후의 변화 경향을 보면, S<sub>C</sub>지반은 S<sub>2</sub>, S<sub>D</sub>지반은 S<sub>2</sub>로, S<sub>E</sub>지반은 S<sub>3</sub>로 재분류되는 경우가 가장 많이 나타났다.

(2) 시추공 기반의 IDW보간법을 적용한 위험지도에 대해 각 격자 내 LPI 최대값과 평균값을 적용한 위험지도를 비교한 적용성 검토결과, 평균값을 사용하는 경우가 시추공 기반의 위험지도와 유사한 것으로 나타났다.

(3) 격자 내 평균값을 이용하여 지하수위와 가속도 변화에 대해 Macro 액상화 위험지도를 작성하여 비교한 결과, 평균지하수위인 5m와 재현주기 500년 수준의 0.11g을 고려한 경우에는 개정 후의 LPI값이 개정 전보다 전반적으로 낮게 산정되는 것이 수치지도 상에 명확하게 나타난 반면, 지하수위 0m와 재현주기 1000년의 경우에는 개정 전후의 변화양상이 미비한 것으로 나타났다. 또한, 평균지하수위 5m시의 재현주기 500년과 1000년의 액상화 발생가능성을 LPI 5를 기준으로 구분하여 분석한 결과, 개정 후 지반증폭계수를 적용한 경우가 개정 전의 값을 적용한 경우보다 액상화 발생가능성이 낮은 부분이 증가하고 높은 부분은 감소하는 것으로 나타났다. 이상으로부터 개정 후의 지반증폭계수는 기존의 지반증폭계수를 사용하는 Macro 액상화 위험지도의 LPI값이 과다산정되는 경향이 있다는 선행연구에서의 지적을 일정 부분 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 향후, 국내 지반에 대한 대표케이스 선정 및 그와 연계된 지반증폭계수의 산정, 다양한 지하수위에 대한 분석, 그리고, 지진응답해석 결과를 토대로 한 LPI값과의 비교분석 등이 후속된다면 국내 전 지역 및 시군구를 대상으로 고도화된 Macro 액상화 위험지도의 작성이 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 “Tech-lead형 액상화 피해 예측 가시화 시스템 및 고효율·저비용 액상화 보강공법 개발” 연구과제의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Ahn, J.K., Baek, W.H., Choi, J.S., and Kwak, D.Y. (2018), “Investigation of Pohang Earthquake Liquefaction Using 1D Effective-Stress Site Response Analysis”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.8, pp.37-49
2. Baek, W. H. (2014), “Development of Real-Time Liquefaction Hazard Map Using Metropolitan Area Site Information Data, University of Seokyeong, Seoul, Korea (in Korean).
3. Baek, W. H., Choi, J. S., and Ahn, J. K., (2018), “Liquefaction Hazard Map in Pohang Based on Earthquake Scenarios”, *Journal of Earthquake Engineering Society in Korea*, Vol.22, No.3, pp. 219-224 (in Korean).
4. Cho, H. K., Manandhar, S., and Kim, D. S. (2016), “Site Classification and Design Response Spectra for Seismic Code Provisions- (I) Database and Site Response Analyses”, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.20, No.4, pp.223-234.
5. Cho, H. K., Manandhar, S., and Kim, D. S. (2016), “Site Classification and Design Response Spectra for Seismic Code Provisions- (II) Proposal”, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.20, No.4, pp.235-243.
6. Cho, H. K., Manandhar, S., and Kim, D. S. (2016), “Site Classification and Design Response Spectra for Seismic Code Provisions- (III) Verification”, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.20, No.4, pp.245-256.
7. Choi, J. S., Park, I. J., Hwang, K. M., and Jang, J. B. (2018), “A Study on Seismic Liquefaction Risk Map of Electric Power Utility Tunnel in South-East Korea”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.19, Issue 10, pp.13-19 (in Korean).
8. Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1997), “User’s Manual for SHAKE91”, Center for Geotechnical Modeling Department of Civil & Environment Engineering University of California, Davis, C.A., pp.1-11.
9. Iwasaki, T., Tatsuoka, K., Tokida, F., and Yasuda, S. (1978a), “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, C.A., Vol.2, pp.885-896.
10. Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda S., and Sato, H. (1982), “Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods”, *Proceedings of 3rd International Conference on Microzonation*, Seattle, pp.1319-1330.
11. Kim, D. S., Lee, S. H., and Yoon, J. K., (2008), “Development of Site Classification System and Modification of Site Coefficients in Korea Based on Mean Shear Wave Velocity of Soil and Depth to Bedrock”, *Journal of Civil Engineering in Korea*, pp.63-74.
12. Ku, T. J. (2010), “Development of Mapping of Liquefaction Hazard Considering Various Ground Condition in Korea”, Master’s thesis, Seokyeong University, pp.38-48 (in Korean).
13. Lee, B. Y., Hwang, B. S., Kim, H. S., and Cho, W. J. (2018), “Precision Improvement Methodology of Geotechnical Information through Outlier Analysis”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.19, No.2, pp.23-35.
14. Ministry of Construction & Transportation and Earthquake Engineer Society of Korea (1997), “Seismic Design Standard (II)” (in Korean).
15. Park, D. H., Kwak, D. Y., Jeong, C. G., and Park, T. H. (2012), “Development of Probabilistic Seismic Site Coefficients of Korea”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.43, pp.247-260 (in Korean).
16. Sun, C. K. (2010), “Suggestion of Additional Criteria for Site Categorization in Korea by Quantifying Regional Specific Characteristics on Seismic Response”, *Journal of Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, KSEG, Vol.13, No.3, pp. 203-218 (in Korean).
17. Sun, C. K., Jeong, C. K., and Kim, D. S. (2005), “A Proposition of Site Coefficients and Site Classification System for Design Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol.21, No.6, pp.101-115 (in Korean).
18. Yoon, J. K., Kim, D. S., and Bang, E. S. (2006), “Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra Considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (I) - Problem Statements of the Current Seismic Design Code”, *Journal of Earthquake Engineering Society in Korea*, Vol.10, No.2, pp. 39-50.

Received : November 19<sup>th</sup>, 2019

Revised : February 20<sup>th</sup>, 2020

Accepted : February 20<sup>th</sup>, 2020