

지진시나리오 기반의 포항지역 액상화위험도 작성 연구

Liquefaction Hazard Map Based on in Pohang Under Based on Earthquake Scenarios

백우현¹⁾ · 최재순^{1)*} · 안재광²⁾

Baek, Woo Hyun¹⁾ · Choi, Jae Soon^{1)*} · Ahn, Jae-Kwang²⁾

¹⁾서경대학교 토목건축공학과, ²⁾기상청 지진화산연구과

¹⁾Department of Civil&Architecture Engineering, Seokyeong University, ²⁾Earthquake and Volcano Research Division, KMA

/ ABSTRACT /

The The purpose of this study is to investigate the actual liquefaction occurrence site in Pohang area and to analyze the ground characteristics of Pohang area using the data of the National Geotechnical Information DB Center and to calculate the liquefaction potential index. Based on the results, the distribution of soil classification in Pohang area and the risk of liquefaction under various earthquake accelerations were prepared. As a result of the study, soils in Pohang has the soil characteristics that can cause the site amplification phenomenon. In the analysis through liquefaction hazard maps under earthquake scenarios, it is found that the liquefaction occurred in the area of Heunghae town is more likely to be liquefied than other areas in Pohang. From these results, it is expected that the study on the preparation of liquefaction hazard maps will contribute to the preparation of countermeasures against liquefaction by predicting the possibility in the future.

Key words: Liquefaction potential index, Distribution of soil type in Pohang, Liquefaction hazard map in Pohang

1. 서 론

최근 경주지진(2017.9.12., $M_L=5.8$)과 포항지진(2017.11.15., $M_L=5.4$)으로 국내에서도 지진에 의한 다양한 피해사례가 발생하였다. 포항 지진의 경우 경주지진보다 작은 지진규모임에도 불구하고 더 큰 피해가 발생하였으며 이 중 액상화로 인한 피해가 여러 곳에서 나타났다. 액상화로 의심되어 접수된 피해사례는 Fig. 1에서 도시하였다. 다수의 피해는 포항 송도동을 중심으로 발생하였고 이밖에 진원지 인근인 망천리에서도 액상화로 의심되는 사례가 보고되었다 [1].

액상화 현상은 주로 포화된 느슨한 모래지반에 지진과 같은 반복하중이 발생할 경우 과잉간극수압의 발생으로 인해 지반이 물과 같이 거동 하는 현상이다. 액상화는 흡입자들이 재배열시키며 지반의 침하 또는 측방유동 등을

야기시킨다. 이와 같은 지반변형은 건축물 및 인프라시설 등에 추가적인 피해를 유발하므로 대비가 중요하다.

대상구간의 액상화 발생 가능성은 현장 및 실내 실험을 통해 쉽게 판별



Fig. 1. Report of suspected liquefaction cases [1]

*Corresponding author: Choi, Jae Soon

E-mail: geotech@skuniv.ac.kr

(Received February 28, 2018; Revised April 24, 2018; Accepted April 26, 2018)

할 수 있지만 광역단위의 예측은 지반조사의 한계로 인해 쉽지 않다. 따라서 광역단위의 액상화 위험성 파악은 GIS기술이 적용된 재해도 혹은 위험도를 통해 평가한다. Youd and Perkins [2]는 California 지역의 액상화 발생 가능성에 대하여 과거에 발생한 지진자료와 지질학적 자료를 활용하여 액상화 위험도를 최초로 제안하였으며, 이때 액상화 발생가능성을 Liquefaction Severity Index (LSI)로 제안하였다. LSI지수는 규모와 이격거리의 경험식을 통해 계산되며, 적용범위는 표준관입시험으로 얻어지는 N 치의 범위 2~10인 퇴적층으로 한정되어 액상화 평가에 한계가 있다. Heidari and Andrus [3]는 South Carolina 지역을 CPT시험의 Data를 기반으로 액상화 가능성지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 산정하고 이를 액상화 위험도로 제시하였다. LPI는 Iwasaki et al. [4]가 제안한 방법으로 층별 액상화 안전율을 기준으로 가능성을 평가하기에 정밀한 예측이 가능하여 국내외적으로 널리 이용되고 있다.

국내의 경우에도 다양한 연구자들이 LPI를 활용한 액상화 위험도 작성의 연구가 수행중이다. Kawk [5]은 연안지역의 항만시설물 중심으로 액상화 위험도를 작성한 바 있으며, Koo [6]는 Eurocode8 [7]에서 제안한 지반종별 지반증폭계수를 이용하여 액상화 위험도를 작성하여 국내 지반 및 지역특성을 고려한 재해도 작성기법을 제안하고 그 타당성 여부를 검토하였다. 하지만 포항지진 이전 국내의 액상화 사례가 기록된바 없기에 사례를 기반으로 검증된 연구는 전무하다. 따라서 본 연구에서는 LPI 기반의 액상화 위험도와 실제 피해지역을 비교하였고 기존 방법의 문제점 및 한계를 고찰하였다.

2. 포항시 액상화 발생 및 피해

포항지진의 영향으로 액상화현상이 포항시 흥해읍과 송도동 인근에서 발견 되었다. 중약진구역으로 분류되어 지진으로 인한 피해기록이 전무하다 할 수 있는 국내에서 처음으로 액상화 현상과 지진으로 인한 건물의 파손 등이 다수 발생한 것으로 그 피해로 이재민이 발생하는 등 지진의 피해가 상당한 수준으로 보고되었다[1]. Fig. 2는 Ha and Jung [8]이 2018년 한국지진공학회에 보고한 액상화 발생위치의 사진이며 현재 발견된 피해지역의 액상화현상은 분사(Sand boil)가 대부분이다. 이와 같은 현상은 진앙지 인근 흥해읍과 해안매립지역인 송도동에서 발생하였는데 지반침하와 같은 심각한 수준의 피해는 아닌 것으로 보고되었다[1].

3. 포항지역의 지반특성

대상구간의 위험도 작성을 위해 본 연구에서는 국토지반정보 통합DB 센터(www.geoinfo.or.kr)에 구축된 시추공 데이터 1,232공을 적용하였다. 포항지역의 조사된 시추공위치도는 Fig. 3에 도시하였으며 대부분 건설공사시 수행된 자료라 도심지역에 많이 분포하는 것을 확인할 수 있다.

지진시 지반응답의 특성은 대상지반의 종류에 따라 달라지며 이때 지반분류는 국내외적으로 30 m 평균 전단파속도 (V_{s30})를 기준으로 한다. 하지만 수집된 지반정보 자료는 표준관입시험의 N 값으로 지반분류를 위해서는 전단파속도로 변환이 필요하다. 본 연구에서 30 m 평균 전단파 속도를 계산하기 위해 Sun et al. [9]이 제안한 식 (1)을 사용하였다.

$$V_s = 65.64N_{(60)}^{0.407} \tag{1}$$

여기서 V_s 는 평균전단파속도, $N_{(60)}$ 은 에너지효율 60%시의 표준관입 저항

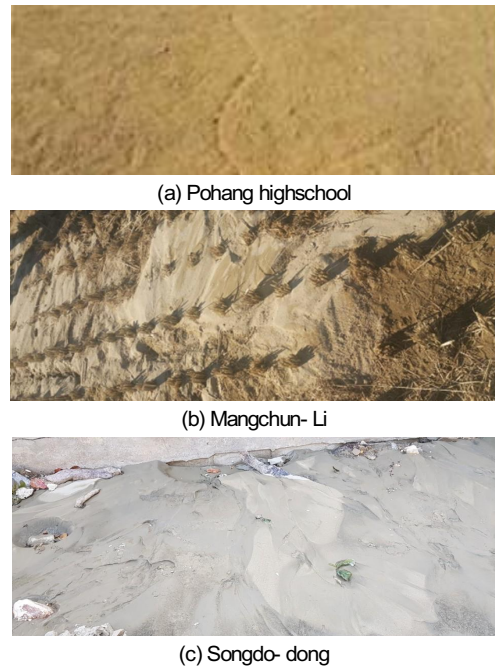


Fig. 2. Liquefaction case [8]



Fig. 3. Borehole location at Pohang

Table 1. Classification according to soil type and amplification factor [7]

Soil type	Soil classification	Shear wave velocity V_{s30} (m/s)	Site amplification factor	SPT-N
S_A	Hard Rock	>1500	-	-
S_B	Rock	760-1500	1.00	-
S_C	Very Dense Soil and Soft Rock	360-760	1.14	> 50
S_D	Stiff Soil	180-360	1.45	15 < N < 50
S_E	Soft Soil	< 180	2.00	< 15
S_F	Site Specific Analysis			

치이다. 단, N 값이 50이상일 경우는 풍화암이라 가정하고 이에 상응하는 전단파 속도를 적용하였다. Vs 30을 기준으로 통해 분류되는 지반 및 증폭계수는 Table 1에 정리하였다.

수집된 시추공데이터를 기반으로 포항지역을 IDW기법을 적용한 지반 분류 맵핑 결과는 Fig. 4에 도시하였다. 본 연구에 적용된 IDW기법은 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중값을 주어 보간하는 방법이다. Fig. 4에 빨간색으로 표시된 곳은 지반분류를 통하여 S_E 지반으로 분류된 시추공 데이터이다. 그 결과 포항지역은 대다수 단단한 토사지반(S_D)으로 넓게 분포하였으며 도심지역은 연약한 지반이 상당수 존재하는 것으로 나타났다.

단, 본 연구에서 사용된 지반분류 및 증폭계수는 최근 제정한 내진설계공통기준 [10]과 상이하다. 이는 내진설계기준 이전에 연구를 시작한 본 연구의 한계점으로써 추후 연구를 통해 보완이 필요하다.

표준관입시험을 통해 획득할 수 있는 N 은 LPI를 이용하여 액상화 위험도 작성시 가장 밀접한 영향을 주는 요소이기에 추가적으로 $N(avg)$ 값을 분석하였으며 이는 Fig. 5에 도시하였다. 이때 $N(avg)$ 의 범위는 $N < 20$ 의 경우 액상화 평가에서 생략됨에 따라 선정하였으며 $N < 15$ 의 경우 KBC 2009 기준에 따라 S_D , S_E 지반에 대한 분류 기준으로 선정하였으며, $N < 10$ 의 경우 일본의 고속도로내진설계기준의 내용을 인용하여 선정하였다 [11]. 그 결

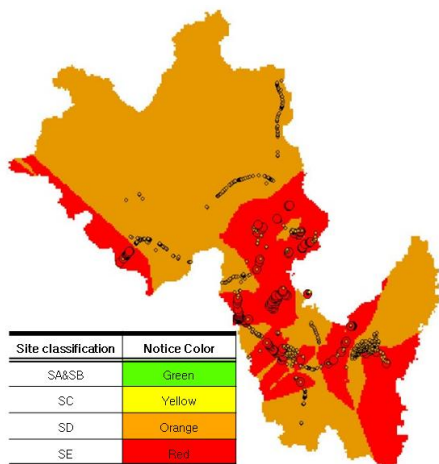


Fig. 4. Using site classification data mapping

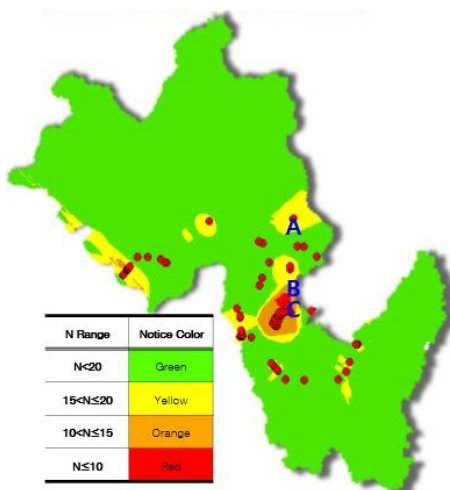


Fig. 5. $N(avg)$ mapping in Pohang

과 대다수의 지역의 $N(avg)$ 값이 20이상 (Green zone) 또는 15에서 20사이 (Yellow zone)에 분포하였으나 93개 시추공데이터가 $N(avg)$ 15이하 (Orange zone), 80개의 시추공데이터가 $N(avg)$ 10이하로 나타났다.

4. Macro 액상화 위험도 작성

4.1 액상화 위험도 작성방법

세계지반공학회 (ISSMGE) 지진연구분과에서는 일본지반공학회가 중심이 되어 액상화 위험도에 관한 매뉴얼을 발간하였다 [12]. 제시된 가이드라인 따르면 국내의 경우 지진피해자료가 부족하기에 예측기법을 기반으로 위험도 작성을 수행하여야 한다. 이와 같이 예측기법을 이용할 경우 간편 예측을 통해 얻어지는 액상화 발생지수를 사용한다. 국내의 경우 중진지역으로 분류되며 국가에서의 광역지역에 대한 액상화 위험도는 간이평가법을 이용하는 것이 합리적일 것이라 판단된다 보고된바 있다 Choi [13]은 국내 광역지역의 액상화 위험도는 작성 프로세스를 제시하였고 이는 Fig. 6과 같다.

4.2 액상화 가능성 지수계산

Iwasaki et al [14]는 액상화가 발생할 것으로 추정되는 지층의 누적 두께 및 지표면으로부터의 심도를 고려하여 액상화 가능성을 판별하는 LPI 방법을 제안하였고 이때 잠재력 (P_L) 은 식 (2)와 같다.

$$P_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \quad (2)$$

여기서 z 는 심도이며, dz 는 심도변화량, $w(z)$ 지반심도 가중치 ($=10-0.5z$)

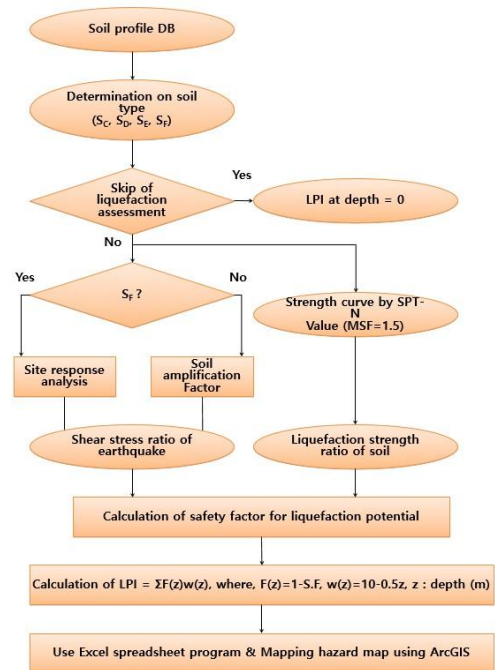


Fig. 6. Analytical procedure for Macro liquefaction hazard map [13]

Table 2. Range of liquefaction damage by LPI [15]

LPI	Level of liquefaction damage
0	No damage
$0 < P_L \leq 5$	Minor damage
$5 < P_L \leq 15$	Medium damage
$15 < P_L < 100$	Extensive damage

Table 3. Comparison of assessment method for liquefaction potential [13]

Evaluation of S.F (S.F = LRR/SRR)		Euro-code	Korea
Shear stress ratio by earthquake (SRR)	Accel.	Domestic criteria	Peak acceleration at bed rock
	Site response	Soil parameter	Site response analysis
	Simplified equation	$\frac{\tau}{\sigma'} = 0.65 \cdot a_s \cdot S \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'}$	$\frac{\tau}{\sigma'} = 0.65 \cdot a_{depth} \cdot \frac{\sigma}{\sigma'}$
Soil liquefaction resistance ratio (LRR)	Curve for liquefaction resistance ratio	LRR curves drawn by SPT/CPT/Vs	LRR curves drawn by SPT/CPT/Vs
	Magnitude	Domestic seismic condition	M = 6.5

$F(z)$ 는 액상화 안전율에 대한 함수이다 ($=1-F_L$). 이때 $F_L > 1.0$ 인 경우, $F(z)=0$ 을 적용한다. 위의 식으로 얻어지는 LPI의 범위는 0에서 100이며 Iwasaki et al. [14] 등이 63개의 액상화 발생지역과 22개의 액상화 미발생 지역을 대상으로 하여 LPI값에 따른 액상화 피해정도와의 상관관계를 Table 2와 같이 정리하였다.

LPI를 산정하는 과정 중 식 (2)의 액상화 안전율 함수를 산정하기 위해서는 액상화 간편법을 수행한다. 대부분의 국내의 내진설계시방에는 지진에 의한 진동전단응력과 지반의 진동저항응력을 비교하여 액상화 안전율을 산정하는 간이평가법을 이용한다. 적용되는 평가법은 Table 3에 정리하였다. 두 방법은 진동전단응력비 산정에 차이가 있다. Fig. 6를 보면 지반 내 지진 거동의 변화를 예측하는 방법으로 지반증폭계수를 이용하는 경우와 지반응답해석을 이용하는 경우로 구분되어 있다. 지반증폭계수를 이용하는 경우는 광역지역에 적합하고 지반응답해석의 경우는 시설물 중심으로 하는 것으로 지진발생이 빈번한 남유럽 일부국가를 제외한 우리나라와 유사하게 중진 지역이 대부분을 차지하는 유럽에서는 지반증폭계수를 이용하여 시설물 중심의 액상화 평가를 수행하여도 무방한 것으로 기준에 명시되어 있다[7]. 이 경우 지반 내 증폭현상을 지층깊이에 관계없이 지반 내 지진의 증폭 정도를 하나의 값으로 획일화함으로 상대적으로 지반깊이가 깊은 곳에서의 지진 증폭을 과도하게 간주하게 되지만 이러한 적용이 안전측의 대책마련과 연계되고 수천공의 지반조사자료를 통해 광역지역의 액상화 위험도를 파악 하는데에는 유효적절한 방법이 될 수 있는 장점이 있다. 이 연구에서는 수천공의 시추공정보를 이용하는 관계로 상기 표에 나타난 지반증폭계수를 이용하여 액상화 평가대상지층으로 결정된 지층에 대해 액상화 평가를 수행하고 이를 종합하여 시추공위치에서의 액상화 발생가능성 지수를 도출하였다. 따라서 넓은 범위의 액상화 위험도의 작성에는 국내의 방법보다 Euro-code가 용이하며 Choi [13]는 이미 국내 지반의 Eurocode 적용의 신뢰성

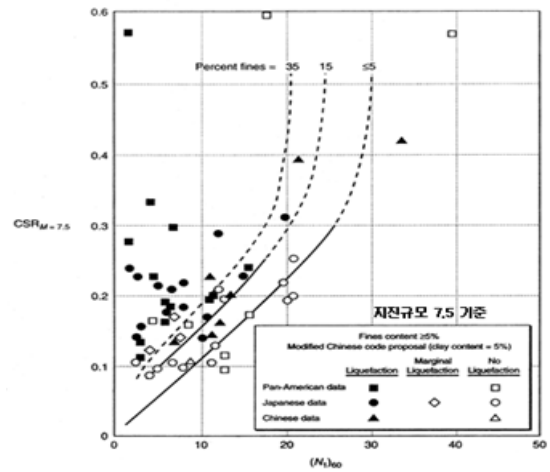


Fig. 7. Curves for liquefaction resistance ratio (Seed et al., 1985) [15]

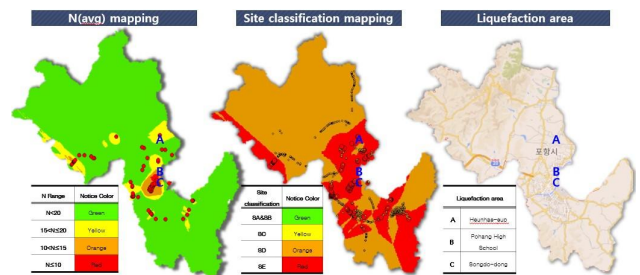


Fig. 8. $N(avg)$ mapping and Site classification mapping comparing to liquefaction area

을 검증한 바 있다. 액상화 저항비 산정곡선은 Fig. 7을 이용하였다.

5. 포항시 액상화 위험도 분석

앞서 언급한 방법에 따라 LPI지수를 계산하고 이를 GIS에 적용하여 액상화 위험도를 작성하였다.

5.1 $N(avg)$ 치 및 지반분류를 통한 비교

Fig. 8는 조사된 $N(avg)$ 를 기준으로 작성된 지도, 지반분류 기준 지도를 실제 액상화 발생 위치와 비교한 결과를 도시하였다. 흥해읍과 송도동 및 포항고등학교는 실제 발생지역과 동일하게 나타났다. 이곳은 토층심도 깊고 10m 이상인 지역으로 실제 액상화 간이평가에서도 위험할 것으로 분류된 곳이다.

5.2 포항본진 기준

Fig. 9은 기반암 최대가속도 0.26 g를 적용한 결과를 실제 액상화 발생 지역과 비교한 결과이다. 이때 기반암 최대가속도는 비교적 단단한 지반위에 위치한 포항관측소 (PHA2)의 본진 계측결과를 그대로 적용하였다. 액상화가 잠재력이 매우 큰 곳은 5곳으로 선정되었으며 이 중 2곳이 실제 액상화가 발생한 지역이다. 이를 통해 LPI지수를 통한 액상화 위험도 평가가 가능한 것으로 나타났다. 대상구간의 현장 조사를 통해 파악된 액상화 피해

는 경미한 수준인 반면 위험도의 LPI지수는 ‘매우 위험’으로 산정되어 과
대 예측의 문제점이 발견되었다. 이는 주기를 고려한 지진파를 특성을 단순

화된 기반암 가속도와 증폭계수 값만으로 고려하는 방법적인 오차와 간소
화되어 입력되어지는 지반정보의 한계로 사료된다.

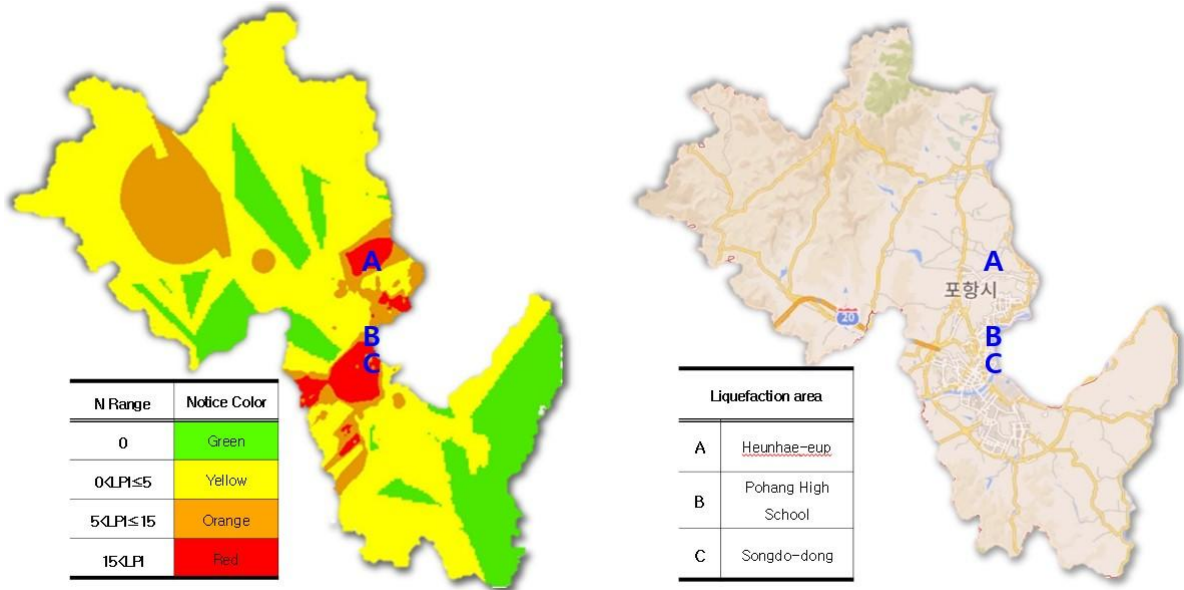


Fig. 9. Comparison damage station and Liquefaction hazard map by PGARock 0.26 g

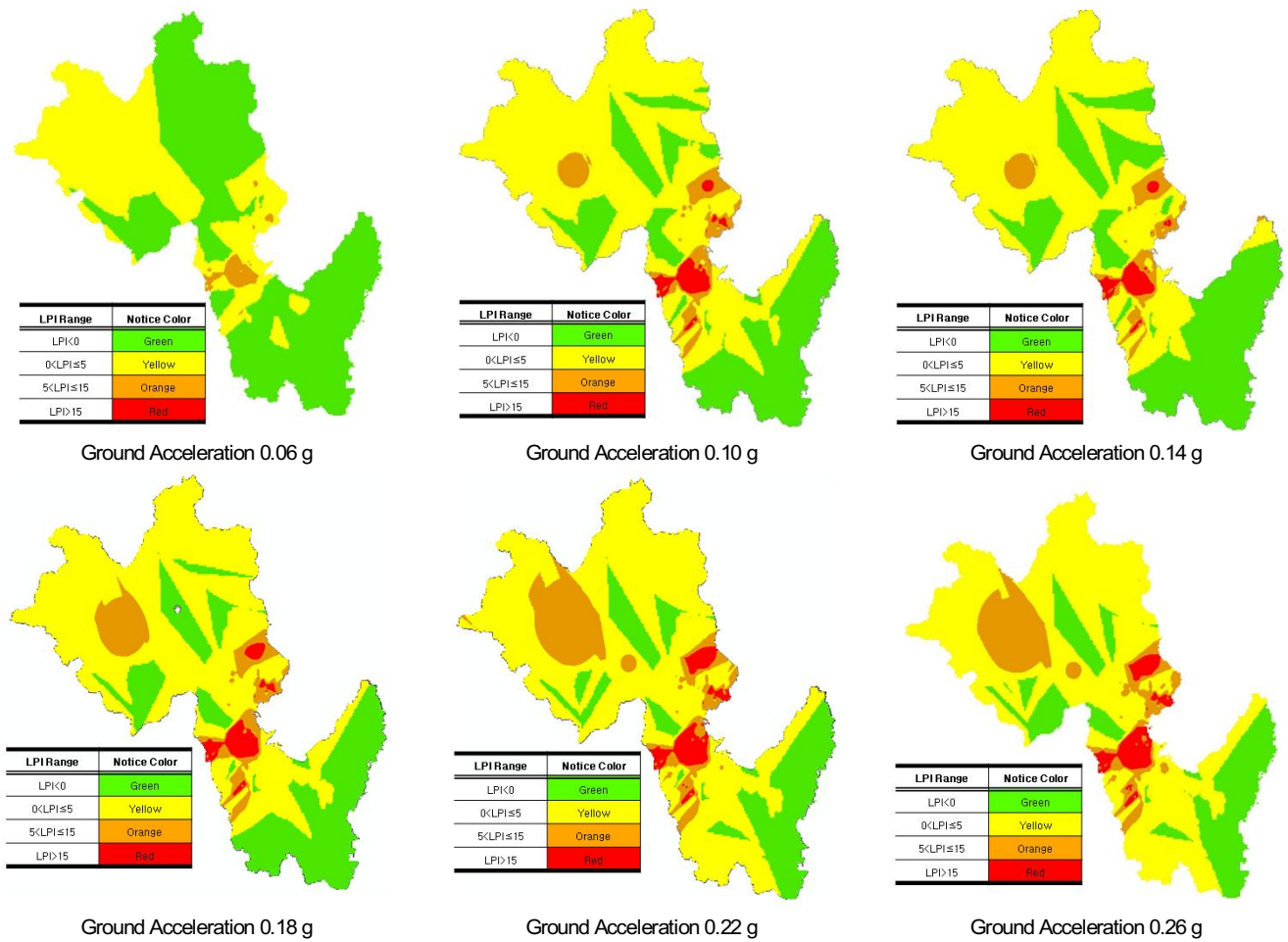


Fig. 10. Liquefaction hazard map for Pohang

5.3 시나리오 기준

Fig. 10는 다양한 지진 시나리오를 가정한 결과를 도시하였다. 이때 재현주기 500년, 1000년, 2400년을 모두 포함할 수 있도록 기반암 지반가속도 0.06 g부터 0.04 g 간격으로 0.26 g까지 6개의 지반가속도를 달리하여 액상화 위험도를 작성하였다. Fig.10을 분석하여 보면 지반가속도 0.06 g에서는 액상화현상 가능성이 크지 않은 것으로 보이고 있으나, 0.10 g부터 액상화 현상 가능성이 매우 큰 것으로 산정되었다. 이 결과는 앞서 언급한 것과 같이 해석방법과 입력의 한계로 과대 예측된 것으로 보이지만 해당지역이 다른 곳보다 상대적으로 위험할 수 있다 것을 확인 할 수 있다.

본진이후 2017년 12월31일까지 발생한 여진중 가장 큰 규모는 최대 4.32이며 pga 0.051 g이고, 15일 이후 중 계측된 여진중 가장 큰 pga는 0.038 g (M=3.52)이다. 이후 여진기록을 통해 위험도와와 상관성을 비교 하자면 크기로 시나시나리오 기준으로 0.06 g의 결과와 비교할 수 있으며 여진으로 인한 추가적인 액상화 피해는 접수되지 않은 것으로 말미암아 현 분석방법에서 중간위험정도(Orange zone)까지는 액상화에 비교적 덜 위험한 곳으로 분석할 수 있다.

6. 결론 및 한계

포항지역의 액상화는 관측기록을 시작한 이래에 최초의 국내 액상화 피해 사례이다. 따라서 액상화에 대한 중요도와 관심이 높아졌고 이에 대한 대책 및 연구도 활성화 되고 있다. 본 연구에서는 포항지역에 Macro기법이 적용된 액상화 위험도를 작성하였다. 작성된 위험도는 실제 피해지역과 비교 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 포항지역에 기반암 가속도를 0.26G로 가정한 경우 포항시 흥해읍과 송도동 주변의 액상화 위험도가 높은 것으로 나타났다. 실제 흥해읍과 송도동에서는 액상화 현상이 발생하였고 이는 본 연구 결과와 어느정도 일치하는 경향을 보였다. 이를 통해 Macro적 액상화 평가방법을 통해 광범위한 지역에 우선적으로 액상화 잠재력을 판별 할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) Macro적 액상화 평가는 적용되는 입력정보의 한계로 인해 LPI지수를 과대하게 산정 할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 국내 실정 및 적용방법에 따른 위험도 범위의 재산정이 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 조사된 지반조사를 바탕으로 평균 N값과 LPI의 상관관계수를 조사한 결과 N값이 낮은 지역은 LPI 지수가 높게 나왔으며 위험지역으로 판별되었다. 이를 통해 LPI와 N값은 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구에서 도출된 위험도는 과거 기준의 지반분류를 적용하여 작성되었기 때문에 추후 연구를 통해 최신 제정된 행정안전부 기준을 적용한 지반분류 및 액상화 위험도 제작이 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 제시된 위험도에서 연일읍, 상대동, 해도동 지역은 액상화에 취약한 것으로 나타난 반면 실제 피해사례는 접수되지 않았다. 이는 모든 지역의 기반암 가속도를 일률적으로 적용하였기 때문이다. 즉, 실제 지진환경을 제대로 모사하지 못한 한계로 추후 연구에서는 감쇠식 혹은 GMPE

를 적용하여 대상구간의 지반운동을 예측하고 이에 따른 액상화 위험도 제작이 요구되는 바이다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2017-MOIS31-001)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Ministry of the Interior and Safety. Pohang Earthquake Response Overall Assesment Conference. c2018 Feb 7.
2. Youd TL, Perkins DM. Mapping of Liquefaction Severity Index. J Geot. Eng. ASCE. 1987;113:1374-1392.
3. Heidari T, Andrus RD. Mapping Liquefaction Potential of Aged Soil Deposits in Mount Pleasant South Carolina. Eng. Geolo. 2010;112(1-4):1-12.
4. Iwasaki et al. Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure. First Int. conf., Geot. Earthq. Eng. Soil Dyn. 1981 Apr;26:209-214.
5. Kawk CW. A Study on the Liquefaction Microzonation at Reclaimed Ports and Harbors in Korea. MS thesis., Yonsei Univ. 2002:20-81
6. Koo TJ. Development of Mapping of Liquefaction Hazard Consider Various Ground Condition in Korea. MS thesis., Seokyeong National Univ. c2010.
7. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Building. c2005.
8. Ha IS, Jung MS. A Case Study on Liquefaction Occurred During the Pohang Earthquake. Proc. EESK conf. 2018 Mar;23:15-16.
9. Sun CK, Jeong CK, Kim DS. A Proposition of Site Coefficients and Site Classification System for Design Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula. J KGS. 2005;21(6):101-115.
10. Ministry of the Interior and Safety. Enforcement Decree of the Earthquake and Volcano Disaster Countermeasure, Paragraph (2) in Article 10. c2017 Mar 29.
11. Port and Harbour Research Institute. Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land. 248.
12. Technical Committee for Earthquake Geotechnical. Engineering. TC4, ISSMGE. Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards. 1999: 72-99.
13. Choi JS. A Proposal on Micro and Macro Mapping Methods for Liquefaction Hazard in Korea. J of KDS. 2016:207-215.
14. Iwasaki T, Tatsuoka K, Tokida, F, Yasuda S. A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan, Proc. 2nd Int. Conf. Microz. NSF. UNESCO, San Francisco. 1978;2:885-896.
15. Seed HB, Tokimatsu K, Harder LF. Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation. J Geot. Eng. ASCE. 1985;111(12): 1425-1445.