

# 지진으로 인한 액상화 지역 및 시설물 안정성 평가

전상수<sup>1\*</sup>, 허대양<sup>2</sup>, 이상승<sup>1</sup>

<sup>1</sup>인제대학교 토목도시공학부, <sup>2</sup>경남도청 도시계획과

## Earthquake-induced Liquefaction Areas and Safety Assessment of Facilities

Sang-Soo Jeon<sup>1\*</sup>, DaeYang Heo<sup>2</sup>, Sang-Seung Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil & Urban Engineering, Inje University

<sup>2</sup>Urban Planning Division, Gyeongsangnam-do Provincial Government

**요약** 액상화는 지진이후 동반되는 2차 피해로서 국내의 경우 현대적 지진 관측이 실시된 이후에는 액상화 현상이 거의 보고되지 않았다. 그러나 최근 한반도 남동부에 위치한 양산단층 인근에서 2016년 9월 12일 규모 5.8의 경주지진과 2017년 11월 15일 규모 5.4의 포항 지진이 발생하였고, 포항 지진 당시 최초로 액상화 현상이 발생하여 한반도 또한 액상화의 안전지대가 아닌 것으로 나타났다. 본 연구에서는 낙동강과 인접해 있으며 양산단층이 통과하는 김해시의 액상화 위험성을 예측하기 위하여 김해시 지역의 표준관입시험(274공) 결과를 바탕으로 각 행정구역과 양산단층과의 거리 산정, 지진규모 5.0, 6.5에 따른 최대지반가속도 값을 도출, 액상화 가능지수 산출, 지리정보체계를 이용한 크리깅의 순차적 연산을 통하여 액상화로 인한 시설물 피해 평가를 실시하였다. 그 결과, 지진 규모 5.0 적용 시 김해시 액상화 발생 지역과 시설물 피해는 미미한 것으로 나타났으나 지진 규모 6.5 적용 시 낙동강 일대에 근접한 행정구역에 액상화 현상이 넓게 분포하였고, 시설물 피해도 상대적으로 크게 발생하는 것으로 나타났다.

**Abstract** Liquefaction is one of secondary damages after earthquake and has been rarely reported until earthquake except Mw = 5.4 15 November 2017 Pohang earthquake in Korea. In recent years, Mw = 5.8 12 September 2016 Gyeongju earthquake and Mw = 5.4 15 November 2017 Pohang earthquake, which induced liquefaction, occurred in fault zone of Yangsan City located at south-eastern part of Korea. This explains that Korea is not safe against liquefaction induced by earthquake. In this study, the distance between the centroid of administrative district and the epicenter located at Yangsan fault, peak ground velocity (PGA) induced by both Mw = 5.0 and 6.5, and liquefaction potential index (LPI), which is calculated by using groundwater level and standard penetration test results of 274 in the area of Gimhae city located in adjacent to Nakdong river and across Yangsan fault, have been estimated and then kriging method using geographical information systems has been used to evaluate liquefaction effects on the damage of facilities. This study presents that Mw = 5.0 earthquake induces a small and low level of liquefaction resulting in slight damage of facilities but Mw = 6.5 earthquake induces a large and high level of liquefaction resulting in severe damage of facilities.

**Keywords** : Earthquake, GIS, Kriging, Liquefaction Potential Index (LPI), Safety of Facilities

### 1. 서론

액상화(liquefaction) 현상은 지하수위가 높고 연약한

모래, 사질토 지반에서 지진동으로 인해 지반 전체가 액체와 같은 유동성의 형태가 되는 것을 말한다. 이는 과잉 간극수압과 유효응력의 감소, 토층의 전단강도 상실 등

\*Corresponding Author : Sang Soo Jeon(Inje Univ.)

Tel: +82-10-9450-5450 email: ssj@inje.ac.kr

Received April 20, 2018

Accepted July 6, 2018

Revised (May 31, 2018, 2nd June 19, 2018, 3rd June 26, 2018)

Published July 31, 2018



(a) Niigata earthquake (b) Loma Prieta earthquake (c) Tohoku earthquake (d) Christchurch earthquake

Fig. 1. Earthquake-induced soil liquefaction[3-6]

으로 인해 발생한다[1,2].

국내에서는 포항 지진 당시 처음으로 그 현상이 보고 되었으나 국외의 경우 1964년 일본 Niigata 지진( $M_w$  7.6), 1989년 미국 Loma prieta 지진( $M_w$  6.9), 1994년 Northridge 지진( $M_w$  6.7), 2011년 일본 Tohoku 지진 ( $M_w$  9.0)과 뉴질랜드 Christchurch 지진( $M_w$  6.2~7.1)에 의해 액상화가 발생하여 건물 및 도로 붕괴, 부등침하, 측방유동, 라이프라인을 비롯한 많은 시설물이 파괴되었으며 피해 형태는 Fig. 1과 같다[3-6].

액상화로 인한 위험등급을 산정하기 위해 액상화 가능 지수(LPI, Liquefaction Potential Index)가 널리 사용되고 있다[7,8]. 액상화 가능지수를 산정하기 위해서는 우선, 액상화 안전율(FS, Factor of Safety)을 산정해야 한다. 액상화 안전율은 지하수위와 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)를 이용하여 액상화 가능성(Potential)을 판단하는데, 안전율이 1.0 이상인 경우에는 ‘안전’, 1.0 미만인 경우 ‘발생 가능’으로 평가한다. 그러나 이러한 액상화 안전율을 이용한 평가방법으로는 지반의 세부적인 피해정도를 예측할 수 없으며 넓은 지역의 액상화 피해 평가 시 국부적인 지역을 제외한 광역지역의 피해를 예측할 수 없는 단점이 있다[7]. 이러한 이유 때문에 최근 이루어지는 액상화 평가 연구는 대부분 Iwasaki et al. (1982)이 제안한 액상화 가능 지수 산정식을 적용하여 광역지역에 대한 액상화 피해 평가를 실시, 액상화 재해도를 제작하고 있다[8-10].

지진 발생 시 액상화 발생 가능성은 지하수위, 지반 특성에 따른 최대지반가속도 크기이다. 현재 국내에서 수행된 광역지역에 대한 액상화 피해 평가는 지진으로 인하여 발생한 최대지반가속도 크기가 평가 대상 지역 전체에 동일하게 적용되고 있다. 그러나 이러한 접근 방법은 지진발생 시 지하수위 및 지반특성을 반영한 액상

화 피해와는 개연성이 부족한 것으로 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 김해시 17개 행정구역의 각종양 지점과 활성단층으로 판정된 양산단층과의 이격거리를 산정, 행정안전부 지진재해대응시스템에 적용중인 감쇠식(Attenuation equations)을 바탕으로 최근 국내에 발생한 지진 규모 5.0과 국내 원자력발전소 내진설계기준인 최대지반가속도 0.2g에 해당하는 규모 6.5의 지진이 발생한 경우 액상화 가능 지수를 산출하여 김해시 시설물의 안정성을 평가 하였다. 그러나 본 연구는 현존하는 표준관입시험을 바탕으로 액상화 발생 가능 지역에 대한 예비평가를 실시하였으므로 추후 상세평가가 필요한 경우에는 보다 정확한 지반특성을 반영할 수 있는 콘관입시험 데이터를 바탕으로 액상화 현상을 규명하는 것이 바람직하다. 또한, 김해지역에 넓게 분포한 충적 사질 퇴적층 지반 특성을 반영할 수 있는 감쇠식 개발이 필요하다.

## 2. 액상화 가능 지수(LPI)

본 연구에 적용한 액상화 가능 지수 산정 식은 Iwasaki et al.(1978)이 제시하였으며 액상화로 인한 피해 정도를 산정할 수 있다. 해당 지수 산정 식은 액상화 평가 대상 지반의 깊이, 지층 특성 등을 반영하여 액상화 발생 가능성을 판단할 수 있으며 식 (1)과 같다[8].

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

해당 식에서  $z$ 는 지표면에서의 심도를 나타내며,  $F(z)$ 는 액상화에 대한 안전율에 대한 함수로서  $FS \leq 1.0$  이며,  $F(z) = 1 - FS$  이고,  $FS > 1.0$  이면,  $F(z) = 0$  이고,  $W(z)$ 는  $z \leq 20m$

일 경우,  $W(z)=10-0.5z$  이고,  $z>20m$  이면,  $W(z)=0$  이다. 액상화 가능 지수는 식 (1)에 의해 이론적으로 0부터 100 사이 값을 가질 수 있으며 Iwasaki et al은 63개의 액상화 발생지역과 22개의 액상화 미발생 지역을 대상으로 하여 액상화 가능 지수 값에 따른 액상화 피해정도와와의 상관관계를 Table 1과 같이 나타내었다[8].

Table 1. Level of liquefaction severity[8]

LPI	Severity
0	Very low
$0<LPI\leq 5$	Low
$5<LPI\leq 15$	High
$15<LPI$	Very high

액상화 가능 지수는 심도 20m 까지의  $F(z)$ 와  $W(z)$ 를 곱한 값을 누적하는 적분 형태의 계산 값으로서 본질적으로 해당 부지에 대한 단일 값으로 산정될 수 있으나 평가 지층의 특성에 맞게 대상 심도를 다르게 고려할 경우에는 해당 심도에서의 액상화 가능 지수 값으로 산정될 수 있다. 예를 들어 평가대상지반 심도 20m 내에 기반암과 같이 액상화 발생 가능성이 없는 지층이 있는 경우, 대상 지반의 액상화 가능 지수 산정 심도는 액상화가 발생 할 수 있는 심도까지의 적분 값으로 산정이 가능하다.

액상화 안전율은 현재 국내외에서 간편예측법으로 가장 많이 사용되고 있는 Seed & Idriss (1971)가 제시한 식 (2)로 산정할 수 있다[11].

$$FS = \frac{CRR}{CSR} * MSF \tag{2}$$

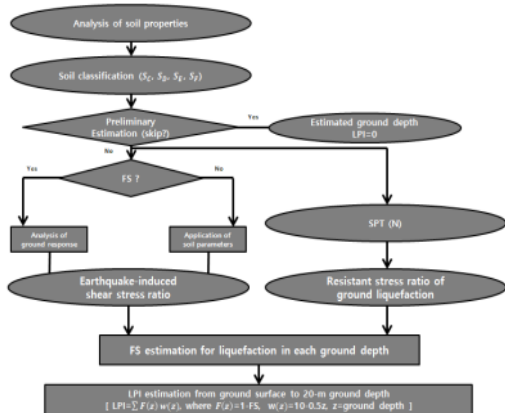


Fig. 2. Flowchart to estimate LPI[12]

CRR(Cyclic Resistance Ratio)은 저항응력비를, CSR(Cyclic Stress Ratio)은 전단응력비를 나타내며 지진 규모에 따라 보정계수(Magnitude Scaling Factor, MSF)를 사용한다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 국내 액상화 가능 지수 판정 흐름도를 바탕으로 액상화 가능 지수를 산정하였고 CSR은 표준관입시험 결과를 바탕으로, CRR은 지반계수를 바탕으로 산정할 수 있다[12].

### 3. 연구내용

#### 3.1 최대지반가속도 산정

지진 발생과 함께 동반되는 최대지반가속도는 지질의 특성, 이격거리, 발생 심도에 따라 그 편차가 매우 큰 요소이며 지진관련 피해 예측, 영향 평가 연구 시 가장 실제와 근접한 값이 산정되어야 하는 항목이다. 최대지반가속도는 진앙지 부근에서 가장 크게 발생하며 이격거리가 증가할수록 점점 감소하기 때문에 본 연구에서는 지진 발생 시 액상화 피해 영향을 모사하기 위하여 각 행정구역별 이격거리 산정후 감쇠식을 바탕으로 최대지반가속도 값을 산정하였다.

##### 3.1.1 진앙지 선정 및 행정구역별 이격거리 산정

Table 2. Distance from fault zone of Yangsan to administrative district

Administrative district	Distance from fault zone of Yangsan (Km)
Daedong-myeon	3.6
Saman-dong	10.1
Buram-dong	10.3
Sangdong-myeon	10.6
Hwalcheon-dong	11.9
Dongsang-dong	12.8
Buwon-dong	13.8
Bukbu-dong	14.2
Hoehyeon-dong	14.5
Chilsanseobu-dong	18.1
Naeoe-dong	18.8
Saengnim-myeon	18.8
Juchon-myeon	19.8
Hallim-myeon	21.7
Jangyu-myeon	24.8
Jillye-myeon	27.0
Jinyeong-eup	28.7

본 연구 대상 지역인 경상남도 김해시는 활성단층으로 판정된 양산단층이 행정구역 주위를 가로지르고 있어

Fig. 3과 같이 김해시 정 중앙지점과 양산단층간의 최단 지점을 진앙지로 선정, 17개 행정구역에 따른 이격거리를 산정하였다. Fig. 4는 김해시 행정구역 대동면과의 이격거리 산정 예시를 나타내며 Table 2는 각 행정구역별 진앙지와의 이격거리를 나타낸다.

3.1.2 최대지반가속도 감쇠식 선정

국내에서 사용 중인 최대지반가속도 감쇠식 중 가장 신뢰도가 높은 감쇠식은 현 행정안전부 지진방재관리과에서 운용하고 있으며 지진재해 대응시스템에서는 Table 3과 같이 이정모 (2000), 박창엽(2003), 연관희 (2005)의 식을 조합하여 사용하고 있다[13-15]. 세 가지 감쇠식을 검토한 결과 연관희의 감쇠식은 국내의 자료와 비교해 볼 때 거리에 따른 최대지반가속도가 너무 과도하게 산정되므로 본 연구에서는 제외되었으나 추후 연구를 통하여 연관희의 감쇠식 그리고 행정안전부에서 제시한 세가지 감쇠식 조합에 대한 적정성 검토가 필요함을 알 수 있다. 이정모와 박창엽 감쇠식이 국내의 자료와 비교해 볼 때 진앙지 이격거리에 따른 최대지반가속도가 서로 유사하므로 본 연구에서는 박창엽 감쇠식을 이용하여 최대지반가속도를 산정하였다.

Table 3. Application ratio of PGA attenuation relationships for earthquake prevention systems[13-15]

Researcher	Published year	Application ratio(%)
Lee et al.	2000	30.0
Baag et al.	2003	40.0
Yun et al.	2005	30.0

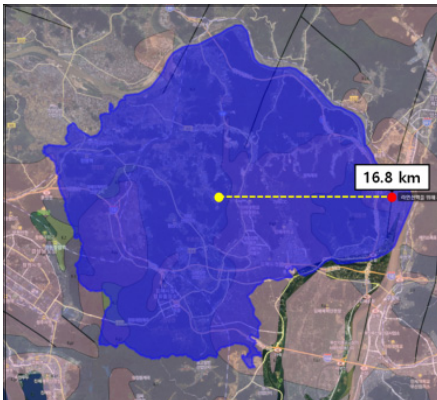


Fig. 3. Distance from epicenter to the centroid of Gimhae City

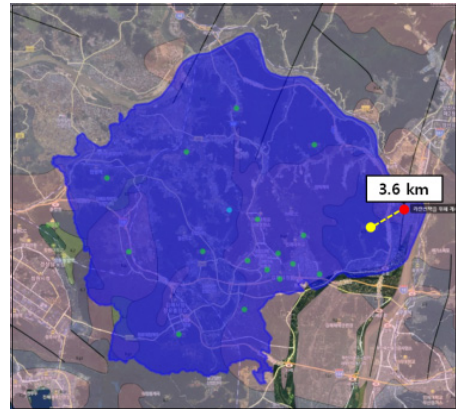


Fig. 4. Estimation of distance from epicenter to Daedong-myeon and the centroid of administrative areas

박창엽의 감쇠식 이론을 일본 및 미국에서 각각 보편적으로 사용하고 있는 Midorikawa (2004), Munson (1997) 이론을 바탕으로 지진 규모 5.0을 적용하여 비교할 경우, 일본 Midorikawa 이론식과 매우 유사하며 미국 하와이(Hawaii) 지반 대상으로산정된 Munson 감쇠식과는 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다[16,17]. 그러나 Fig. 5에 나타나듯이 박창엽의 감쇠식 이론을 적용한 경우 반경 10km 이하에서 데이터 취득이 불가능한 상태에서 감쇠식이 개발되어 타 감쇠식에 비해 과도한 최대지반가속도가 산정됨을 알 수 있다. 식 (3)과 식(4)는 박창엽의 감쇠 식을 나타내고 Table 4은 최대지반가속도 감쇠식 계수를 나타낸다.

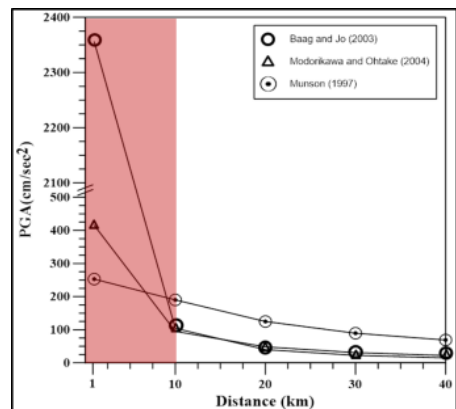


Fig. 5. PGA vs. distance from epicenter

Table 4. Parameters of attenuation relationship for PGA[14]

	$\epsilon_0^0$	$\epsilon_0^1$	$\epsilon_0^2$	$\epsilon_1^0$	$\epsilon_1^1$	$\epsilon_1^2$	$\epsilon_2^0$	$\epsilon_2^1$	$\epsilon_2^2$	$\epsilon_3^0$	$\epsilon_3^1$	$\epsilon_3^2$
PGA	0.1073829 $\times 10^2$	-0.2379955 $\times -10^2$	-0.2437218	0.5909022	0.2081359 $\times -10^3$	0.9498274 $\times -10^1$	-0.5622945 $\times -10^1$	-0.2046806 $\times -10^4$	-0.8804236 $\times -10^2$	0.2135007 $\times -10^2$	0.4192630 $\times -10^4$	-0.3302350 $\times -10^2$

$$\ln PGA\left(\frac{cm}{sec^2}\right) = c_0 + c_1R + c_2 \ln R - \ln[\min(R, 100)] \quad (3)$$

$$- \frac{1}{2} \ln[\max(R, 100)]$$

여기서,  $R$  = 진앙지와의 이격거리

$c_k(0, 1, 2) =$  상수항

$$c_k = \epsilon_0^k + \epsilon_1^k(M_w - 6) + \epsilon_2^k(M_w - 6)^2 + \epsilon_3^k(M_w - 6)^3 \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon_1^k = (k = 0, 1, 2; i = 0, 1, 2, 3)$

### 3.2 최대지반가속도 산정

연구 대상 지역의 액상화 가능 지수 산정을 위하여 국토지반 정보 포털사이트와 김해시, 민간 건설사를 통해 총 903개의 Standard Penetration Test (SPT) 데이터를 수집하여 분석하였다. 그러나 국내 SPT 데이터의 양식 불일치, 중요 계수 정보 누락 등으로 인하여 다량의 데이터가 자료로서의 가치를 상실하여 분류 작업 후 신뢰성 있는 274개의 시추조사 데이터를 선정하였다. 이러한 데이터를 지리정보체계(Geo Information System)로 도시화하여, Fig. 6에 나타내었다.

앞서 언급한 바와 같이 SPT 데이터의 위치가 통일된 좌표로 기재되어 있지 않고 타원체(GRS80, Bessel 등), 원점(서부, 중부, 동부, 동해 등), 원점가산(2009년 12월 전, 후), 10.405초 보정(1998년 5월 전, 후)에 따른 위치 편차가 매우 심하므로 좌표를 통일하여 위치를 산정하고 크리깅 기법을 사용하여 액상화 가능지수 등치선을 작성하였다. 또한, Fig. 6에 나타나듯이 SPT 데이터가 김해시 내에 고르게 분포하지 않고 점선으로 표시된 중앙 내륙의 북부동, 낙동강과 인접한 상동면 및 대동면과 같이 특정 지역 내에 밀집되어 있음을 알 수 있다.

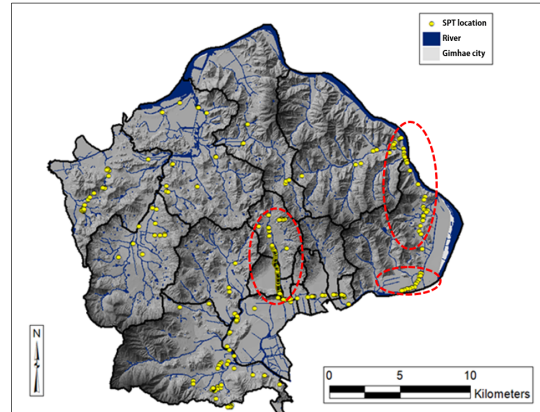


Fig. 6. Locations of SPT used for LPI estimation

### 3.3 김해시 사회기반시설

본 연구 수행 시 적용된 김해시 시설물은 Table 5와 같이 총 9개 시설로 구성되어 있다.

Table 5. Facilities in Gimhae City

Facility	Total
Tunnel	15
Bridge	412
Light rail transit (km)	24.6km
Railway (km)	91.3km
Road (km)	1,145.3km
Water pipe (km)	1,340.0km
Sewage pipe (km)	1,502.0km
Public facility	96,729
Shelter outside a building	27

## 4. 사회기반시설 안정성 평가

### 4.1 규모 5.0, 6.5 지진으로 인한 LPI 공간분포

Fig. 7의 (a), (b)는 각각 지진규모 5.0, 6.5 적용 시 액상화 발생 가능지역을 나타내고 (c), (d)는 지진규모 5.0, 6.5 적용 시 액상화 가능 지수 등급별 발생가능지역 비율을 나타낸다.



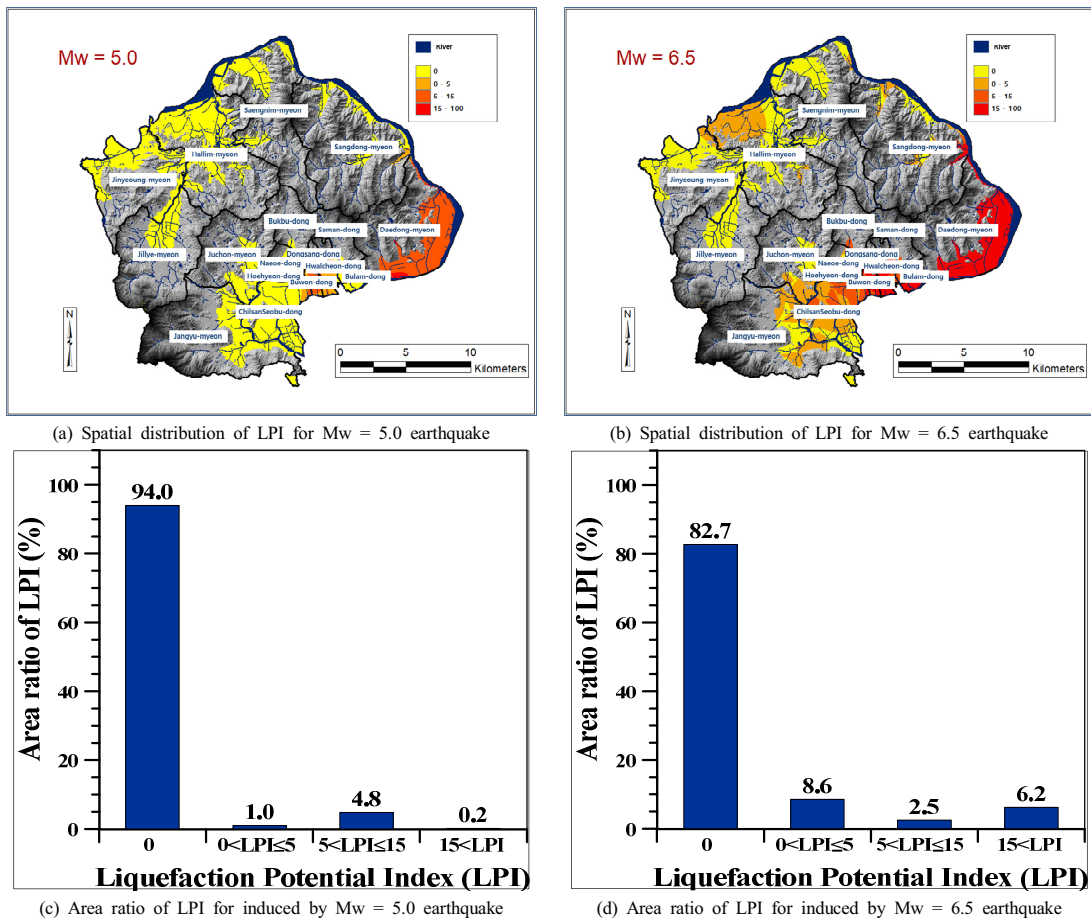


Fig. 7. Spatial distribution and area ratio of LPI induced by Mw = 5.0 and 6.5 earthquakes, respectively

지진 규모 5.0 적용 시 김해시 전체 면적에서 액상화 가능 지수가 ‘매우 높음’에 속하는 면적은 2km<sup>2</sup>(0.2%)이며 ‘높음’에 속하는 면적은 22.1km<sup>2</sup>(4.8%)이며 대부분의 지역이 ‘매우 낮음’ 지역(94.0%)에 속하는 것으로 나타났다. 지진 규모 6.5 적용 시에는 액상화지수가 ‘매우 높음’에 속하는 면적은 28.6km<sup>2</sup>(6.2%), ‘높음’에 속하는 면적이 11.5km<sup>2</sup>(2.5%)이고 ‘낮음’ 지역에 속하는 면적이 39.6km<sup>2</sup>(8.6%)이다. 산정된 수치를 분석하면 각 지진 규모에 따른 액상화 가능 지수 분포 면적이 전체 면적 대비 변화가 크지 않은 것으로 보이나 평지에서는 상대적으로 차이가 큰 것을 알 수 있다. 지진규모 증가에 따라 액상화 피해 발생가능지역이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 대표적으로 지진규모 5.0, 6.5 적용 시 액상

화 가능 지수 공간분포를 교량, 빌딩, 상수도관로와 중첩하여 나타내었으며 Fig. 9는 액상화 가능 지수에 따른 시설물 분포를 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 지진규모 6.5인 경우에는 지진규모 5.0에 비해 상당히 많은 시설물들이 피해정도가 커짐을 알 수 있다.

#### 4.2 규모 5.0 지진에 따른 액상화 가능지수 (LPI) 산정 및 시설물 안정성 평가

지진규모 5.0 적용 시 터널 및 철로의 경우 모든 시설물이 피해정도 ‘매우 낮음’ 지역에 있는 것으로 나타났으며 경전철로를 제외한 나머지 시설물 모두 피해정도 ‘매우 낮음’ 지역에 80.0% 이상의 시설이 있는 것으로 나타났다. 피해정도 ‘낮음’ 지역에 있는 시설물 중 비율이 5.0% 이상인 시설물은 경전철로(2.8km(11.2%))와 하수

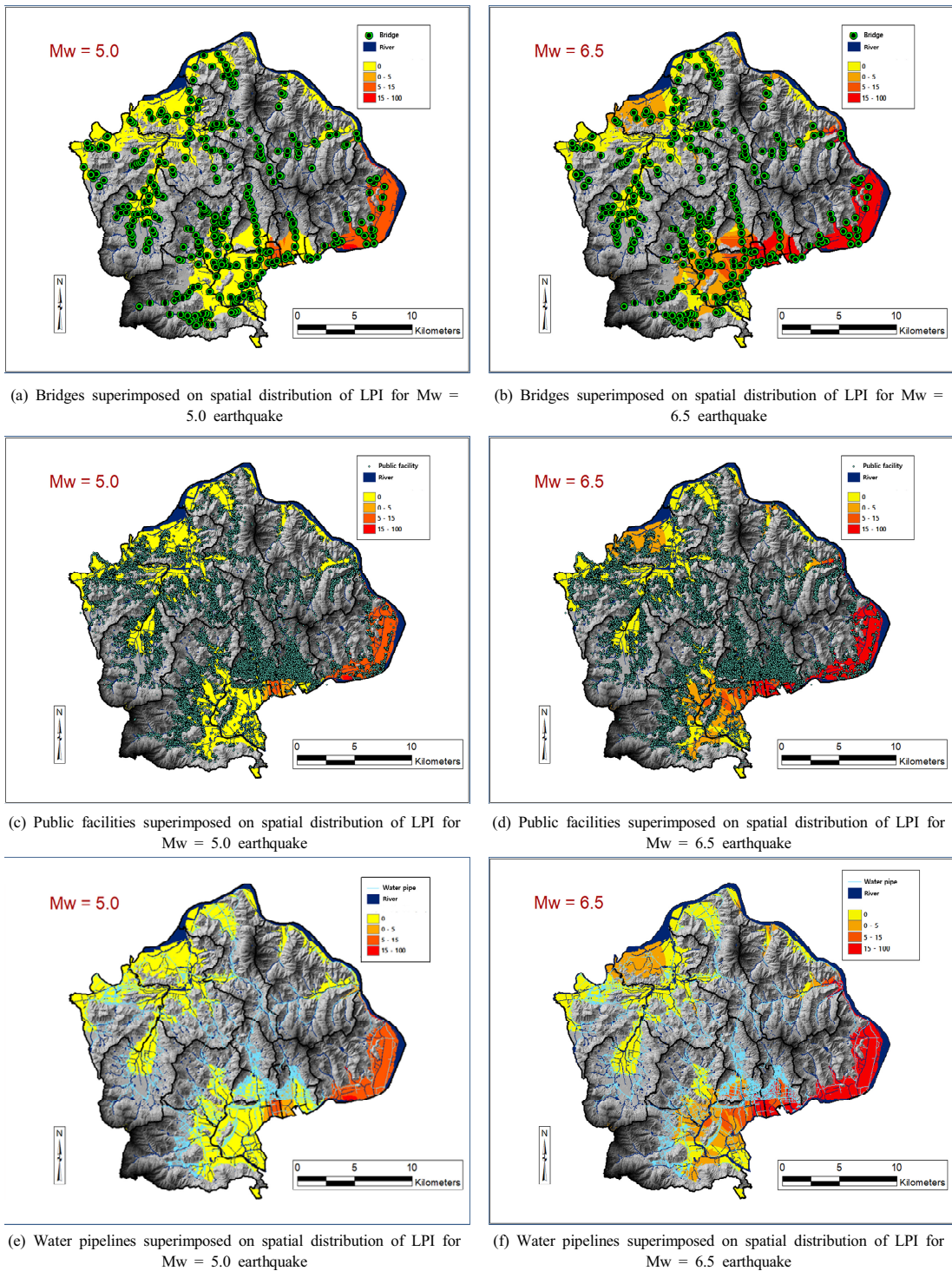
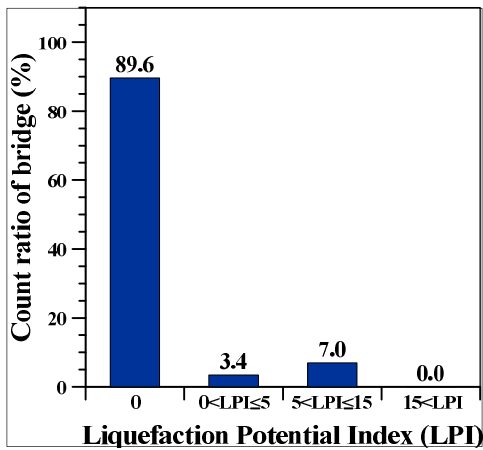
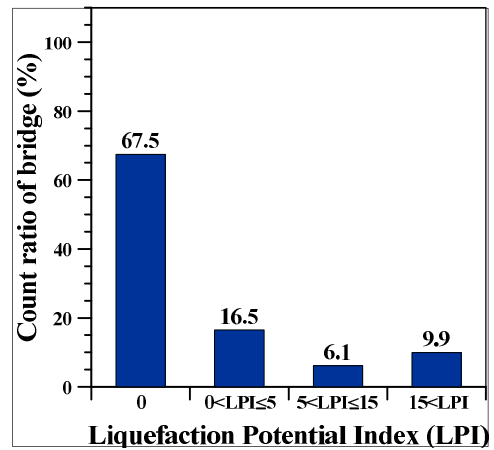


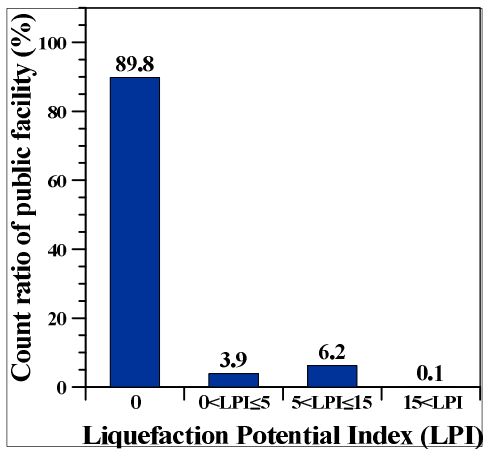
Fig. 8. Bridges, buildings, and water pipelines superimposed on spatial distribution of LPI induced by Mw = 5.0 and 6.5 earthquakes, respectively



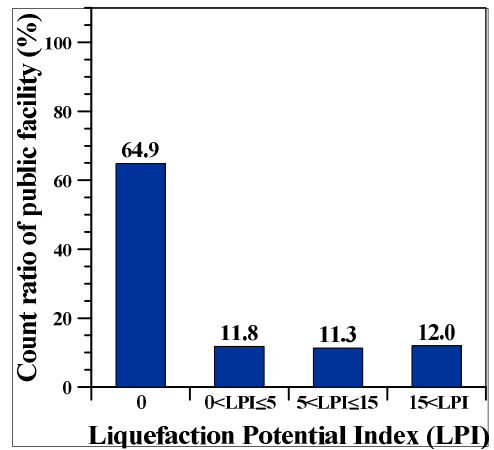
(a) Bridges covered by LPI for Mw = 5.0 earthquake



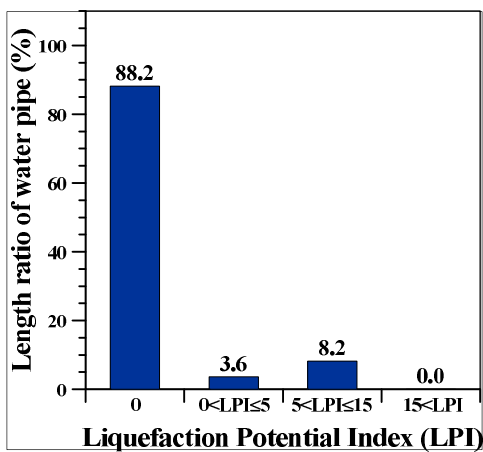
(b) Bridges covered by LPI for Mw = 6.5 earthquake



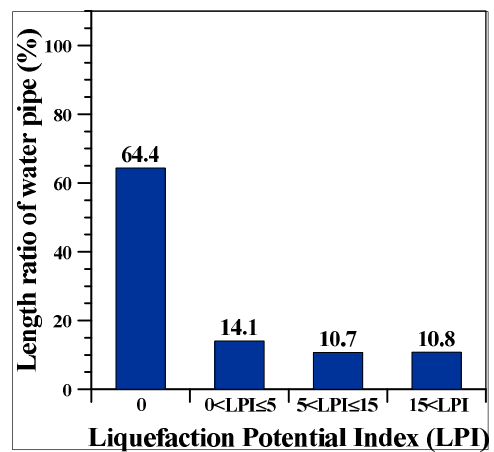
(c) Public facilities covered by LPI for Mw = 5.0 earthquake



(d) Public facilities covered by LPI for Mw = 6.5 earthquake



(e) Water pipelines covered by LPI for Mw = 5.0 earthquake



(f) Water pipelines covered by LPI for Mw = 6.5 earthquake

Fig. 9. Bridges, buildings, and water pipelines covered by LPI induced by Mw = 5.0 and 6.5 earthquakes, respectively



Table 6. Ratio of facility covered by LPI for Mw = 5.0 earthquake

Facility	LPI			
	0	0-5	5-15	15-100
Tunnel (%)	15 (100)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
Bridge (%)	369 (89.6)	14 (3.4)	29 (7.0)	0 (0.0)
Light rail transit, km (%)	19.6 (79.6)	2.8 (11.2)	2.2 (9.2)	0.0 (0.0)
Railway, km (%)	91.3 (100.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
Road, km (%)	1,041.2 (90.9)	41.2 (3.6)	61.8 (5.4)	1.1 (0.1)
Water pipeline, km (%)	1,181.9 (88.2)	48.2 (3.6)	109.9 (8.2)	0.0 (0.0)
Sewage pipeline, km (%)	1,357.8 (90.4)	75.1 (5.0)	67.6 (4.5)	1.5 (0.1)
Public facility (%)	86,862 (89.8)	3,772 (3.9)	5,997 (6.2)	98 (0.1)
Shelter outside a building (%)	24 (88.9)	1 (3.7)	2 (7.4)	0 (0.0)

Table 7. Ratio of facility covered by LPI for Mw = 6.5 earthquake

Facility	LPI			
	0	0-5	5-15	15-100
Tunnel (%)	14 (93.3)	0 (0.0)	1 (6.7)	0 (0.0)
Bridge (%)	278 (67.5)	68 (16.5)	25 (6.1)	41 (9.9)
Light rail transit, km (%)	6.3 (25.7)	2.8 (11.5)	8.5 (34.2)	7.0 (28.6)
Railway, km (%)	76.2 (83.5)	14.5 (15.9)	0.6 (0.6)	0.0 (0.0)
Road, km (%)	714.5 (62.4)	189.5 (16.6)	117.8 (10.3)	123.5 (10.7)
Water pipeline, km (%)	863.4 (64.4)	188.0 (14.1)	143.6 (10.7)	145.0 (10.8)
Sewage pipeline, km (%)	874.2 (58.2)	242.6 (16.1)	205.6 (13.7)	179.6 (12.0)
Public facility (%)	62,777 (64.9)	11,414 (11.8)	10,930 (11.3)	11,608 (12.0)
Shelter outside a building (%)	16 (59.3)	6 (22.2)	1 (3.7)	4 (14.8)

도관(75.1km (5.0%))뿐인 것으로 나타났으며, 피해정도 ‘높음’ 지역에 있는 시설물 중 비율이 5.0% 이상인 시설물은 교량(29개소(7.0%)), 경전철로(2.2km(9.2%)), 도로(61.8km(5.4%)), 상수도관(109.9km(8.2%)), 구조물(5997개소(6.2%))로서 피해정도 ‘낮음’ 지역에 있는 시설물 보다 ‘높음’ 지역에 있는 시설물이 상대적으로 많은 것으로 나타났다. 피해정도 ‘매우 높음’ 지역에 있는 시설물은 도로(1.1km(0.1%), 하수도관(1.5km(0.1%)) 및 구조물(98개소(0.1%))로서 세가지 시설물 모두 0.1% 비율로 ‘매우 높음’ 지역에 있는 시설물은 극소수인 것으로 나타나 액상화로 인한 피해는 크지 않음을 알 수 있다. Table 6는 지진 규모 5.0 적용 시 액상화 가능 지수 해당지역별 시설물이 차지하는 비율을 나타낸다.

### 4.3 규모 6.5 지진에 따른 액상화 가능지수 (LPI) 산정 및 시설물 안정성 평가

지진 규모 5.0 적용에 비해 규모 6.5 적용시 전체적으로 시설물 피해정도가 증가하는 것으로 나타났으며 액상화 피해정도 ‘매우 낮음’ 지역에 시설물은 없는 것으로 나타났다. 피해정도 ‘매우 낮음’ 지역에 있는 시설물 중 가장 높은 비율의 시설물은 터널(14개소(93.3%))이며

가장 낮은 비율은 경전철로(6.3km(25.7%))인 것으로 나타났다 나머지 시설물 또한, 피해정도 ‘매우 낮음’에 있는 비율이 최소 6.7%에서 최대 31.2%인 것으로 나타났다. 피해정도 ‘낮음’에 있는 시설물 중 터널(0개소(0.0%)), 옥외대피시설(6개소(22.2%))을 제외한 나머지 시설물은 10%대에 있는 것으로 나타났으며 피해정도 ‘매우 높음’ 지역의 경우 터널(0개소(0.0%)), 철로(0km(0.0%))를 제외한 나머지 시설물이 있는 비율은 9% 이상인 것으로 나타나 전체적으로 피해정도 ‘매우 위험’에 있는 시설물의 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 경전철로의 경우 피해정도 ‘매우 높음’ 지역에 있는 경전철로의 (7.0km(28.6%))노선 길이가 ‘매우 낮음’ 지역에 있는 노선 길이(6.3km(25.7%))보다 긴 것으로 나타났다. Table 7은 지진 규모 6.5 적용 시 액상화 가능 지수에 따른 시설물 비율을 나타낸다.

## 5. 결론

포항지진 당시 국내에 처음으로 발생 사례가 보고된 액상화 현상은 지진과 함께 동반되는 위험요소로서 사전에 예방대책이 반드시 이루어져야 하는 재해이다. 본 연

구에서는 지진 규모(5.0, 6.5)의 지진발생시 김해시 액상화로 인한 시설물 피해 평가를 실시하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 지진규모 5.0 적용 시 김해시 행정구역 내의 액상화 가능 지수 발생 비율은 피해정도 ‘매우 낮음’ 지역이 전체 지역의 94%(433.5km<sup>2</sup>)로서 대부분의 지역을 차지하는 것으로 나타나 액상화로 인한 시설물의 위험도는 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 그러나 대동면의 경우 피해정도 ‘높음’과 ‘매우 높음’ 지역이 포함되어 있어 액상화로인한 위험성이 높은 것으로 나타났다.

2. 지진규모 6.5 적용 시 김해시 행정구역 내의 액상화 가능 지수 발생 비율은 피해정도 ‘매우 낮음’ 지역이 82.7%(381.4km<sup>2</sup>), “높음” 지역이 2.5%(11.5km<sup>2</sup>) 인 것으로 나타나 지진규모 5.0 적용 시에 비해 각각 약 11.3%, 2.3% 감소한 반면에 피해정도 ‘낮음’ 과 ‘매우 높음’ 지역이 7.6%(35.1km<sup>2</sup>), 6.0%(27.7 km<sup>2</sup>) 증가한 것으로 나타났다. 이를 통하여 ‘매우 낮음’이 ‘낮음’으로 ‘높음’이 ‘매우 높음’으로 전이되었음을 알 수 있다. 지진규모 5.0 적용 시 대부분의 지역은 액상화 피해정도가 “매우 낮음”으로 나타났으나 지진규모 6.5 적용 시에는 액상화 피해정도 “매우 높음” 이 넓게 분포하여 김해시 전 지역에서 액상화로 인한 위험이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

3. 지진 규모에 따른 시설물 피해 평가 결과 지진 규모 5.0 적용 시, 피해정도 “매우 높음” 지역에 있는 시설물은 도로, 배수관로, 공공시설물 뿐이며 해당 시설물들 또한 0.1% 미만의 매우 낮은 비율로 나타났다. 경전철로를 제외한 모든 시설물이 피해정도 “매우 낮음” 지역에 80% 이상 있어 전반적으로 액상화 발생 지역이 많지 않아 액상화로인한 시설물 피해 또한 높지 않은 것으로 나타났다. 그러나 지진 규모 6.5 적용 시에는 액상화 발생 지역 및 위험도 증가로 인하여 터널, 철로를 제외한 모든 시설물이 액상화 피해 정도 “매우 높음” 지역에 9.0% 이상 경전철로의 경우 약 30%가 피해정도 “매우 높음” 지역에 있다. 또한, 액상화 피해정도 “낮음”, “높음” 지역에 있어 시설물이 최소 5% 에서 최대 30%까지 증가하여 시설물의 액상화 피해 영향이 매우 크게 증가하는 것으로 나타났다.

4. CSR 산정을 위해 조사된 SPT 자료와 액상화 가능 지수 값을 통하여 액상화로인한 시설물 피해평가를 검토한 결과, 김해시 낙동강 일대와 서 낙동강 일대는 퇴적층

및 매립층의 분포가 상당히 넓어 액상화로 인한 피해가 다른 행정구역에 비해 상대적으로 크게 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 양산단층이 직접적으로 관통하는 행정구역은 지진발생 시 지반의 특성에 따른 지반증폭현상이 동반 될 가능성이 매우 커 피해가 극대화 될 것으로 예상되며 이에 대한 대비가 우선적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

최근 발생하는 지진이력을 살펴보면, 해마다 발생 횟수와 지진규모 증가와 더불어 피해 규모 또한 증가하고 있으므로 액상화가 예상되는 지역의 지하수위 및 지반 특성을 조사하여 사전에 예방하는 것이 필요하다. 그러므로 기존에 조사된 SPT 자료와 추후에 조사될 SPT 자료의 조사자료 양식을 통일화하고 액상화 산정을 위한 계수 정보 등을 체계적으로 수립하는 방안이 이루어져야한다. 추후에는 지반의 특성을 보다 정확하게 반영하는 CPT(cone penetration test) 자료를 이용한 액상화 발생 가능성과 비교·검토가 필요하며 본 연구에서는 선형적으로 분포한 시추조사 자료를 바탕으로 공간분석을 수행하였으나 추후에는 현 시추조사 주변지반의 자료를 추가하여 신뢰도가 높은 공간분석을 실시하는 것이 필요하다.

## References

- [1] S. L. Kramer, “Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall Upper Saddle River”, New Jersey, 1996.
- [2] T. L. Youd, I. M. Idriss “Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”, *Journal of Geotech. Geoenv. Eng.*, Vol. 127, No. 10, pp. 817-833, 2001.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:4(297))
- [3] S. Bhattacharya, M. Hyodo, K. Goda, T. Tazoh, C. A Taylor, “Liquefaction of soil in the Tokyo Bay area from the 2011 Tohoku (Japan) earthquake”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol. 31, pp. 1618-1628, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.06.006>
- [4] M. Cubrinovski, B. Bradley, L. Wotherspoon, R. Green, J. Bray, C. Wood, M. Pender, J. Allen, A. Bradshaw, G. Rix, “Geotechnical aspects of the 22 February 2011 Christchurch earthquake”, Civil & Naturl Resources Engineering, University of Canterbury & Christchurch, 2011.
- [5] T. D. O'Rourke, S-S. Jeon, S. Toprak, M. Cubrinovski, M. Hughes, S. van Ballegooy, D. Bouziou, "Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ", *Earthquake Spectra*, Vol. 30, No.1, pp. 183-204, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1193/030413EQS062M>

- [6] J. Eidinger, "C.A Davis, Recent earthquakes: implications for US water utilities", Water Research Foundation, 2012.
- [7] T. L. Holzer, "Probabilistic liquefaction hazard mapping", *Proc., 4th Conference on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE, Sacramento, CA., pp. 1-32, 2008.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/40975\(318\)30](https://doi.org/10.1061/40975(318)30)
- [8] T. Iwasaki, K. Tokida, F. Tatsuoka, S. Watanabe, S. Yasuda, H. Sato, "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods", *Proc., 3rd Int. Conf. on Microzonation*, Seattle, WA. pp. 1319-1330, 1982.
- [9] D. H. Lee, C. S. Ku, H. Yuan, "A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin, Taiwan", *Eng. Geol.*, Vol. 71, pp. 97-117, 2003.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00128-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00128-5)
- [10] J. W. Chung, J. D. Rogers, "Simplified method for spatial evaluation of liquefaction potential in the St. Louis area", *Journal of Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 137, No. 5, pp. 505-515, 2011.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000450)
- [11] H. B. Seed, I. M. Idriss, "Ground motions and soil liquefaction during earthquake", Earthquake Engineering Research Institute Monograph, Oakland, CA, 1982.
- [12] J. S. Choe, T. J. Ku "A study on mapping of Liquefaction Hazard at a Megalopolis in Korea", International Symposium on Urban Geotechnics, *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*, pp. 25-26, 2009.
- [13] J. M. Lee, D. H. Park, C. E. Baag, "Stochastic prediction of strong ground motions and attenuation equation in the southeastern korean peninsula", *Autumn conference of Earthquake Engineering Society of Korea*, pp. 70-76, 2000.
- [14] N. D. Jo, C. E. Baag, "Estimation of spectrum decay parameter  $\alpha$  and stochastic prediction of strong ground motions in southeastern korea", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 7, No. 6 pp. 59-70, 2003.  
DOI: <https://doi.org/10.5000/EESK.2003.7.6.059>
- [15] I. K. Choi, N. Masato, Y. S. Choun, O. Yasuki, K.-H. Yun, "Study on the earthquake ground motion attenuation characteristics in korea and japan using 2005 Fukuoka earthquake record", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 10, No. 4, pp. 45-54, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.5000/EESK.2006.10.4.045>
- [16] S. Midorikawa, Y. Ohtake, "Variance of peak Ground Acceleration and Velocity in Attenuation Relationship", *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Aug. 2004*.
- [17] C. G. Munson, "Analysis of the attenuation of strong ground motion on the island of Hawaii", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87 No. 4, pp. 945 - 960. 1997.

전 상 수(Sang-Soo Jeon)

[정회원]



- 1992년 6월 : Oregon State University (해양공학석사)
- 1996년 12월 : University of Colorado, Boulder(지반공학석사)
- 2002년 1월 : Cornell University (지반공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2005년 2월 : 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 토목도시공학부 교수

<관심분야>

지반, 재해, 안전, 지진, 매설관, GIS

허 대 양(Daeyang Heo)

[준회원]



- 1992년 2월 : 성균관대학교 (토목공학학사)
- 2008년 2월 : 인제대학교 (토목공학 석사)
- 2016년 5월 : Florida Institute of Technology (토목공학 석사)
- 2006년 12월 : 측량 및 지형공간정보 기술사

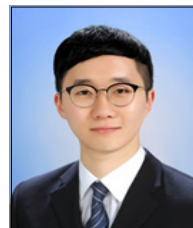
• 1993년 12월 ~ 현재 : 경남도청 사무관

<관심분야>

지반, 재해, 안전, 지진

이 상 승(Sang-Seung Lee)

[준회원]



- 2016년 2월 : 인제대학교 토목공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 인제대학교 토목공학과 (지반공학석사)

<관심분야>

지반, 재해, 안전, 지진