

# 빅데이터 지반정보의 불확실성을 고려한 중진지역에서의 액상화 위험도 작성기법 개발

## Development of Mapping Method for Liquefaction Hazard in Moderate Seismic Region Considering the Uncertainty of Big Site Investigation Data

곽민정<sup>1)</sup> · 구태진<sup>2)</sup> · 최재순<sup>†</sup>

Minjung Kwak · Taijin Ku · Jaesoon Choi

Received: August 12<sup>th</sup>, 2014; Revised: October 1<sup>st</sup>, 2014; Accepted: November 7<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT** : Recently, Korean government has tried out to set up earthquake hazards prevention system. In the system, several geotechnical hazard maps including liquefaction hazard map and landslide hazard map for the whole country have drawn to consider the domestic seismic characteristics. To draw the macro liquefaction hazard map, big data of site investigations in metropolitan areas and provincial areas has to be verified for its application. In this research, we carried out site response analyses using 522 borehole site investigation data in S city during a desirable earthquake. The soil classification was separately compared to shear wave velocity considering the uncertainty of site investigation data. Probability distribution and statistical analysis for the results of site response analyses was applied to the feasibility study. Finally, we suggest a new site amplification coefficient, hereby presented with the similar results of liquefaction hazard mapping using the calculated liquefaction potential index by the site response analyses. Above-mentioned study will be expected to help to follow research and draw liquefaction hazard map in moderate seismic region.

**Keywords** : Geotechnical earthquake hazard, Liquefaction, Macro liquefaction hazard map, Liquefaction potential index, Site amplification coefficient

**요지** : 최근 우리 정부는 안전한 대한민국이라는 슬로건 아래 지진재해를 포함한 자연재해피해를 최소화하는데 많은 노력을 집중하고 있으며, 이를 위해 산사태 위험도와 액상화 위험도와 같은 지진 시 지반피해 GIS 시스템 데이터가 구축되고 있는 실정이다. 우리나라 전역을 포함하는 지진 시 액상화 위험도를 작성하기 위해서는 수많은 지반시추정보에 대한 적용성 검토가 필요하다. 본 연구에서는 액상화 위험도 작성을 위해 인구밀도가 높은 광역지역의 지반증폭계수를 검토하였으며 이를 위해 S시 522개 시추공 지반 정보를 수집하여 지반응답해석을 수행하였다. 이때 지반분류는 지반정보의 불확실성을 고려하고자 현행 내진 설계기준에서 제안하고 있는 시추종료 깊이 이후의 지반 정보를 30m로 가정하는 경우와 지반정보의 오리지널 데이터 값만을 이용하는 경우로 나누어 비교하였으며, 타당성 검토 시에는 지반응답해석 결과에 대한 확률분포와 통계분석을 이용하여 수행하였다. 최종적으로 정규분포를 통한 신뢰도 50%, 70%, 90%에 대한 지반증폭계수를 도출하여 액상화 위험도를 도시하였으며, 이를 지반응답해석을 통해 도시한 LPI 액상화 위험도와 비교하여 가장 유사한 값을 추천하였다. 연구결과 제안된 지반증폭계수가 향후 국내 액상화에 대한 연구와 중진지역의 광역지역 액상화 위험도 작성에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

**주요어** : 지진 시 지반피해, 액상화, 광역지역 액상화 위험도, 액상화 가능성 지수, 지반증폭계수

## 1. 서론

세계지반공학회(ISSMGE) 지진연구분과(TC4)에서는 일본지반공학회가 중심이 되어 액상화 위험도에 관한 매뉴얼(개정판)을 발간한 바 있다. 이 내용에서는 액상화 위험도 작성단계를 3단계로 나누고 있으며 우리나라와 같이 지진 피해자료가 부족한 경우에는 경험적 방법을 이용하는 1, 2

단계보다는 예측기법을 통한 3단계의 위험도 작성을 추천하고 있다(JGS, 1999).

예측기법을 통한 3단계 방법을 이용하는 경우, 액상화 평가와 같은 간편예측을 통해 액상화 발생에 대한 지수를 이용하는 것이 일반적인데 Iwasaki et al.(1978a)은 액상화 위험도를 작성하는 기준 지표인 액상화 가능성 지수(LPI, Liquefaction Potential Index)를 제안하였고, Todorovska & Trifunac(1999)

1) Department of Urban & Environmental System Engineering, Seokyeong University

2) Dasan Consultant Co.

† Deptment of Civil & Architectural Engineering, Seokyeong University (Corresponding Author : geotech@skuniv.ac.kr)

은 실험과 에너지 개념에 바탕을 둔 액상화 위험도 작성법을 제안하였다. 또한 1998년 Monge et al.(1998)은 액상화 발생 기준을 입도분포 등의 질적 기준과 지진에 의한 전단 응력비와 같은 양적 기준으로 구분하여 3차원 공간상에서 위험도를 작성하는 방법을 제안한 바 있다. 최근의 액상화 위험도를 보면 GNS Science Consultancy의 Beetham, R. D. et al.(2011)이 발표한 보고서에서는 뉴질랜드 크라이스트처치에서 발생한 지진에 대해 GIS기법을 이용하여 액상화 위험도를 연구발표 한 바 있으며, Heidari & Andrus(2010)는 CPT시험의 Data를 기반으로한 LPI를 이용하여 South Carolina 지역을 바탕으로 액상화 위험도를 도시한 바 있다.

우리나라의 경우 1980년대 들어서 지진위험도에 관한 연구가 시작되었으나 지진가속도, 지진규모 등 지질학적 관점에서의 연구들이 대부분으로 지반공학적 관점에서 액상화 위험도 작성연구는 20세기 들어선 이후 본격적인 연구가 시작되었다. Kwak(2001)은 Iwasaki(1978a)가 제안한 액상화 가능성 지수(Liquefaction Potential Index)를 이용하여 연안 지역의 항만시설물 중심으로 액상화 위험도를 작성한 바 있으며 Ku(2010)는 Eurocode 8(ECS, 1998)에서 제안한 지반종별 지반증폭계수를 이용하여 액상화 위험도를 작성한 바 있다. 또한 액상화 위험도에 이용되는 지반증폭계수에 대한 국내 연구의 경우 Sun et al.(2005), Park et al.(2012), Sun (2010)은 국내 지반에 대한 합리적 증폭계수와 함께 국내 고유의 지역적 지반 특성을 고려한 부지 분류 체계를 제안한 바 있다. 최근에는 소방방재청에서는 우리나라 지진대응 시스템 구축을 위해 다양한 지진 시 위험도 작성에 많은 연구력을 집중시키고 있는 실정이다. 그러나 액상화 위험도의 경우 국내 적합한 액상화 평가법(Kim et al., 2000)에서는 지반증폭에 대한 자세한 지반응답해석을 포함하고 있어 이를 이용하여 우리나라 전지역에 대한 액상화 위험도를 작성할 경우, 수년 이상의 시간이 소요될 것으로 예상되고 있다.

이 연구에서는 액상화 위험도 작성 시 수많은 지반정보를 취급해야 하는 점을 고려하여 현행 국내설계기준에서 제안하는 지반응답해석이 아닌 지반종별 지반증폭계수의 적용을 추천하고 이에 대한 타당성 검토를 수행하고자 한다. 이때 이 계수들에 대한 타당성 검토를 위해 1,000만 인구를 넘는 S시의 522개 시추공 정보를 토대로 지반응답해석을 수행하고 그 결과에 대한 확률분석을 수행하고자 한다. 최종 위험도 작성을 위한 지반증폭계수는 확률분포를 통해 추천된 신뢰도별 지반증폭계수 적용 시의 액상화 위험도와 지반응답해석결과를 토대로 도시한 액상화 위험도를 비교하여 가장 유사한 신뢰도의 지반증폭계수를 추천하고자 한다.

## 2. 액상화 위험도 작성기법

지진피해자료가 전무한 우리나라의 경우, 액상화 위험도는 서론에서 설명한 3단계 예측방법 중 지반조사자료를 토대로 액상화 예비평가 및 간이평가를 수행하고 이를 통해 획득된 시추깊이별 액상화 안전율을 통해 액상화 가능성 지수(LPI)를 산정하여 수치지도에 나타내는 것이 효과적이다.

Fig. 1은 이상의 내용을 정리하여 국내에 적합한 액상화 위험도 작성요령을 나타낸 것으로서 이 연구에서는 Fig. 1에 표시된 지진에 의한 전단응력비를 기준시설물(기초 및 지반) 내진 성능평가 및 향상요령에서 추천하는 지반응답해석을 통하는 방법과 Big Data 지반정보 처리를 위해 지반증폭계수를 적용하는 방법으로 구분하여 산정·비교하였다. 이때 이용된 지반조사자료는 S시 522개소의 시추공 정보이며 시추공 정보로부터 지반응답해석 및 지반분류 시에는 좌표와 표준관입시험 결과를 주로 이용하였다.

### 2.1 액상화 가능성 지수

Iwasaki et al.(1978b)는 액상화가 발생하는 층의 누적 두께 및 지표면으로부터의 깊이가 20m 이내인 지반을 대상으로 액상화 평가안전율이 1 미만인 지층들에 의해 해당지점의 액상화에 대한 피해 정도가 결정된다고 Eq. (1)과 같이 제안하였다.

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

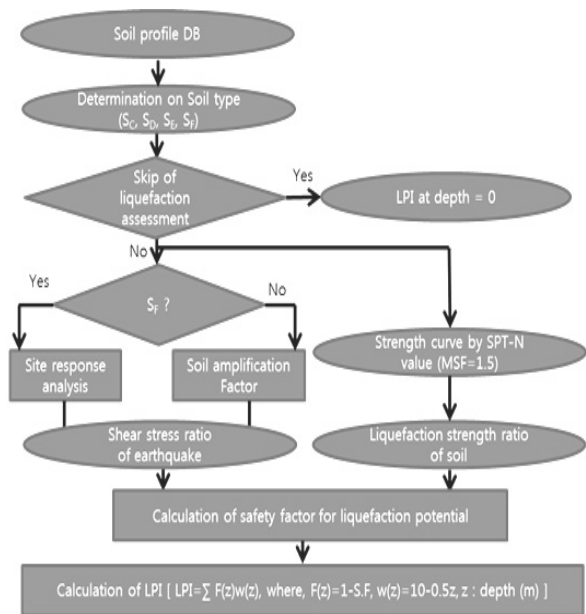


Fig. 1. Analytical procedure for Korean liquefaction hazard map

여기서  $z$ 는 깊이이며,  $dz$ 는 깊이변화량, FL은 액상화 안전율  $F(z)=1-FL$ : 액상화 안전율 함수로

$FL > 1.0$ 인 경우,  $F(z)=0$ 이며,

$w(z)=10-0.5z$  : 지반깊이 가중치이다.

위의 식으로 얻어지는 액상화 가능성 지수, LPI의 범위는 0~100이며 Iwasaki et al.(1982b) 등이 63개의 액상화 발생 지역과 22개의 액상화 미발생 지역을 대상으로 LPI값과 액상화 피해 정도와의 상관관계를 Table 1와 같이 나타내었다.

## 2.2 국내 액상화 평가법

LPI를 산정하는 과정 중 Eq. (1)의 액상화 안전율 함수를 산정하기 위해서는 액상화 평가를 통하는 것이 일반적이다. 대부분의 국내외 내진설계시방에는 지진에 의한 전단응력비와 지반의 저항응력비를 비교하여 액상화 안전율을 산정하는 간이평가법을 이용한다. 이러한 간이평가법 중 대표적인 방법으로는 불규칙한 지진하중을 등가의 정현하중으로 고려하는 Seed의 방법(Seed et al., 1985)이 있으며 중진지역으로 구분되는 유럽과 우리나라에서도 이를 근간으로 아래와 같이 중진지역으로 구분되는 자국의 지진특성에 맞게 보완하여 이용하고 있다.

Table 2에서 차이점은 지진에 의한 전단응력비 산정 시 우리나라의 경우에는 지반응답해석을 수행하도록 보완한 반면, 유럽에서는 이를 간편화한 지반종별 지반계수(지반증폭을 표현)를 사용하는 점이다. 이 간이평가는 액상화 위험

도 작성보다는 신설 또는 기존 시설물의 액상화 발생가능성을 평가하는데 주로 이용되므로 중진지역과 같이 지진피해 자료가 많지 않을 경우에는 우리나라와 같이 지반증폭현상을 좀 더 자세하게 예측하는 방법이 해석결과의 신뢰도를 높일 수 있을 여지가 높은 반면, 이 방법을 이용하여 광역지역 액상화 위험도 작성을 수행하게 될 경우, 지반증폭해석에 너무도 많은 시간을 소요하게 될 수 있다. 한 예로 현재 우리나라 국가지반정보 DB센터에서 보유하고 있는 지반시추공정보가 약 10만 개소인데 이를 기초로 전국단위의 액상화 위험도 작성을 위해서 지반응답해석을 수행하게 되면 이 해석시간만 약 1만 시간 정도가 필요하게 된다.

이 연구에서는 이러한 점을 고려하여 광역지역 액상화 위험도 작성에는 Euro-code에서 이용하는 지반계수(지반종류에 따라 규정된 지반증폭계수)를 이용하는 것이 지반응답해석으로 소요되는 시간을 대폭 단축시킬 수 있는 방법으로 판단하였다. 다만 지반종별 지반증폭계수가 실제 우리나라 지반의 지반증폭특성을 적절하게 표현할 수 있는 지 여부를 검토할 필요가 있으므로 이 연구에서는 이에 대한 적용성 검토를 수행하였다. Table 3은 우리나라 내진설계기준과 Euro-code에서 규정된 지반종별에 따른 지반증폭계수를 나타내고 있다.

Table 3에서 지반종류의 분류는 시추공정보를 이용하여 지반고 30m까지의 전단파속도 평균값을 산정하여 지반종류를 판정하게 된다.

## 3. Macro 액상화 위험도 작성기법

### 3.1 액상화 위험도 작성기법

우리나라와 같이 중진지역으로 구분되는 국가에서의 광역지역에 대한 액상화 위험도는 지반증폭계수를 이용하여 작성하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 특히 국내 액상화 평가의 경우, 지반조사 자료로는 표준관입시험의 결과를

Table 1. Level of liquefaction damage by LPI

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

Table 2. Assessment method for liquefaction potential (Korea & Euro-code)

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	$\left(\frac{\tau_o}{\sigma'_o}\right) = 0.65 \times a \times S \times \frac{\sigma_o}{\sigma'_o}$	$\left(\frac{\tau_o}{\sigma'_o}\right) = 0.65 \times a_{zsd} \times S \times \frac{\sigma_o}{\sigma'_o}$
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

Table 3. Amplification coefficient according to soil type (Korea & Euro-code)

Soil Type	Soil Classification	Shear wave velocity $V_{S_{60}}$ (m/s)	Site amplification factor	
			Korea	Euro-code
SA	Hard Rock	> 1,500	-	-
SB	Rock	> 760	1.00	1.00
SC	Very Dense Soil and Soft Rock	> 360	1.18	1.14
SD	Stiff Soil	> 180	1.45	1.45
SE	Soft Soil	$\leq 180$	2.00	2.00
SF	Site Specific Analysis			

이용하고 Table 2의 액상화 간이평가를 수행하는 경우가 일반적이다. 이 점을 고려하여 우리나라 광역지역의 액상화 위험도는 Fig. 2에 나타난 흐름에 기초하여 지반정보 Data를 획득하여 액상화 평가를 수행하고 심도별 가중치를 계산하여 LPI를 산정, 위험도를 나타내는 지표로 사용하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단된다.

또한 표준관입저항치를 이용한 액상화 평가가 일반적이므로 Table 2의 액상화 저항비 산정곡선도 Fig. 3을 이용하는 것이 바람직하다.

Fig. 3은 지진규모 7.5 기준으로 작성된 것으로 우리나라의 적용 시 미국과 일본에 비해 강진의 횡수나 빈도가 현저히 적은 여건을 고려하여 6.5를 사용하고 있으며, 이에 따른 국내 발생가능 지진규모 6.5에 해당하는 지진규모 보정계수를 1.5로 추천하고 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs & Korea infrastructure safety and Technology Corporation, 2011).

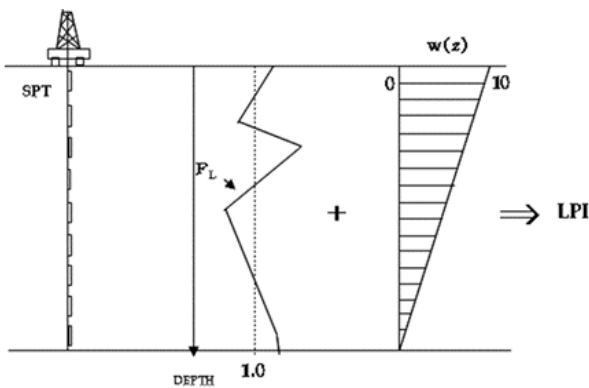


Fig. 2. Analytical procedure for liquefaction hazard map

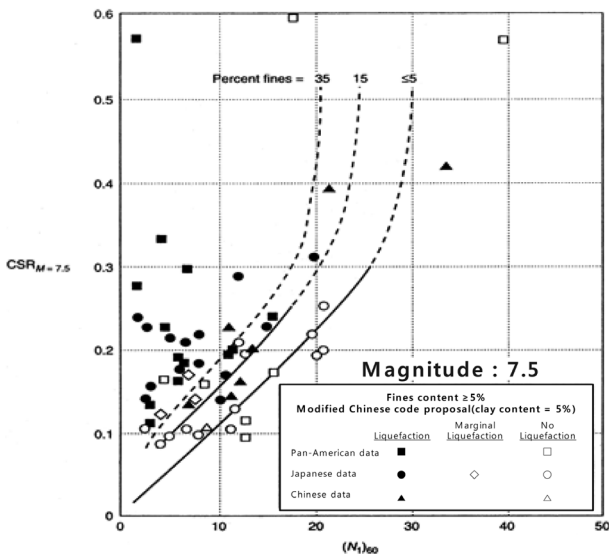


Fig. 3. Curves for liquefaction resistance ratio (Seed et al., 1985)

### 3.2 국내 지반시추정보의 불확실성

실제 우리나라 내륙지반을 굴착하게 되면 Fig. 4에 나타난 바와 같이 시추깊이 10m 부근의 풍화암 및 연암의 존재로 인해 지반종류를 구분하는데 필요한 30m까지 시추조사를 수행하지 못하는 경우가 대부분이다.

이러한 경우, 지반분류는 30m 이내의 시추종료까지는 시추정보를 경험식에 직접 대입하여 Table 3의 평균전단파속도 산정을 위한 지층별 전단파속도를 산정하며 시추종료깊이 이후의 지반정보는 일반적으로 표준관입저항치를 300으로 간주하여 전단파속도를 산정한다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs & Korea infrastructure safety and Technology Corporation, 2011). 이때 시추종료의 경우에는 대부분 표준관입저항치가 50으로 경험식을 이용하게 될 경우 약 320m/sec의 값을 갖게 되며, 시추종료 후의 깊이에 대해서는 표준관입저항치 300으로 가정하여 경험식에 대입하게 되므로 약 670m/sec의 값이 산정되게 된다. 여기서 Eq. (2)는 Sun et al.(2005)이 국내 실정에 맞는 전단파속도를 제안한 식을 사용하였다.

$$V_s = 65.64 N_{60}^{0.407} \quad (2)$$

여기서  $N_{60}$ 은 에너지효율 60% 시의 표준관입저항치이다. 이 연구에서는 시추종료 후의 지반조사자료에 대한 불확실성을 고려하여 현재 일반적으로 이용하고 있는 기존의 방법(Case 1)과 시추종료 후의 지반정보 불확실성을 완전 배제하는 방법(Case 2)으로 구분하여 지반분류를 수행하였다. 즉 Case 1의 경우는 30m 이내 시추조사가 종료된 경우 시추종료 후의 지반에 대해서는 표준관입저항치 300의 풍화암으로 가정한 경우이고, Case 2의 경우에는 30m 이내 시추조사

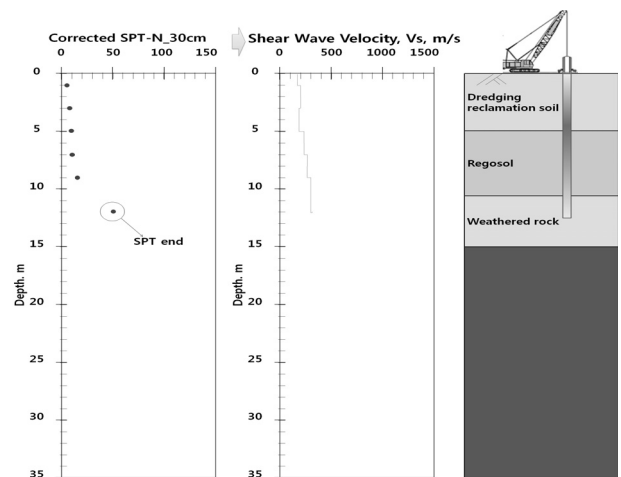


Fig. 4. Uncertainty of soil investigation data

자료만을 이용하여 지반분류를 수행한 경우이다. 이상의 방법들에 의해 지반분류를 수행하게 되면 다음 Table과 같이 지반종류가 다르게 판정될 수 있다. Table 4는 G구 A3동의 Case 1의 경우이고, Table 5는 동지역의 Case 2의 경우이다.

Table 4와 Table 5의 결과를 보면 Case 1의 경우로 30m 이내의 전단파속도의 평균을 산정하면 547.65m/s로 SC지반으로 분류되는 반면, Case 2의 경우로 산정하면 SD지반으로 분류되어 지반의 불확실성을 어떻게 고려하느냐에 따라 지반분류가 다르게 나타나게 된다. 현재 국내 내진시방서에서는 Case 1의 경우로 지반을 분류하도록 제안되어 있으나 이는 대표적인 강진지역인 미국 서부의 지반특성을 반영한 내용을 인용한 것으로 향후 이에 대한 국내 적용성 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이상과 같이 522개소의 시추공 정보를 토대로 지반분류를 수행한 결과, Case 1의 경우 생략지반 175개소, SC지반 337개소, SD지반 10개소로 분류된 반면, Case 2의 경우에

는 생략지반 175개소, SC지반 112개소, SD지반 235개소로 분류되었다. 이때 생략지반은 지반조사결과 중 시추깊이가 5m 이내인 경우로 지반응답해석 시 지반증폭의 변화가 크지 않은 점을 고려한 것이다. 이상의 내용을 요약하면 Fig. 5와 같다.

#### 4. 광역지역 액상화 위험도 작성 시 지반증폭 계수의 적용성 검토

이 연구에서는 국내 내진설계 기준의 지반증폭계수를 Case 1의 경우와 Case 2의 경우로 구분하여 적용한 결과와 실제 지반응답해석(Proshake)을 통해 획득한 결과와 비교하여 지반증폭계수의 이용에 대한 타당성 검토를 수행하였다. 이때 기수행된 모든 결과들을 확률분석하여 평균 및 분산을 구하고 이에 대한 정규분포곡선을 획득하였다.

##### 4.1 지반응답해석

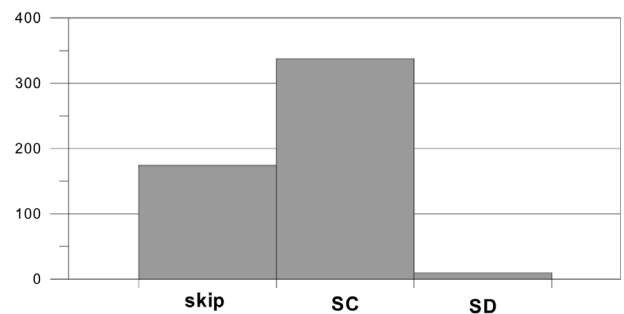
지반응답해석은 S시 시추공 정보를 기초로 하여 수행되었으며 시추공의 위치는 Fig. 6에 나타난 바와 같다. 또한 이 연구에서는 일반적으로 지반이 1차원적으로 형성되어 있는 점을 고려하여 1차원 등가선형해석 프로그램인 Shake계열(Idriss & Sun, 1997)의 프로그램을 이용하여 지반응답해석을 수행하고 시추공별 지층별 가속도를 획득하였다.

Table 4. Case 1 (A3-Dong, G-gu, S City)

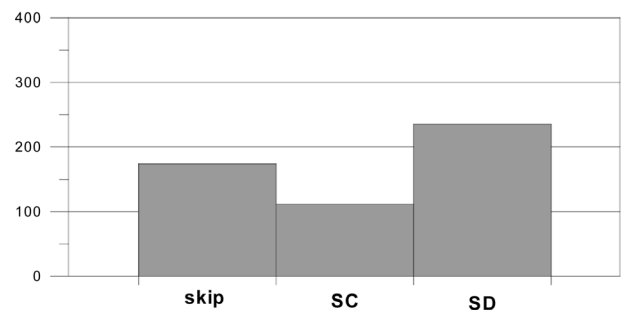
Soil type	Depth (m)	Thickness (m)	N <sub>corr</sub> , 30 cm	V <sub>s</sub> (m/s)	V <sub>S<sub>30</sub></sub> (m/s)
Sand	1	1	12	180.5	547.7 ↓ SC site
Sand	1.5	0.5	12	180.5	
Sand	2.5	1	14	192.2	
Sand	3	0.5	14	192.2	
Sand	4	1	37	285.4	
Sand	5	1	37	285.4	
Sand	6	1	37	285.4	
Sand	7	1	50	322.6	
Sand	8	1	50	322.6	
Sand	9	1	50	322.6	
Weathered rock	10	1	300	668.9	
Weathered rock	30	20	300	668.9	

Table 5. Case 2 (A3-dong, G-gu, S city)

Soil type	Depth (m)	Thickness (m)	N <sub>corr</sub> , 30 cm	V <sub>s</sub> (m/s)	V <sub>S<sub>30</sub></sub> (m/s)
Sand	1	1	12	180.5	305.7 ↓ SD site
Sand	1.5	0.5	12	180.5	
Sand	2.5	1	14	192.2	
Sand	3	0.5	14	192.2	
Sand	4	1	37	285.4	
Sand	5	1	37	285.4	
Sand	6	1	37	285.4	
Sand	7	1	50	322.6	
Sand	8	1	50	322.6	
Sand	9	1	50	322.6	
Weathered rock	10	1	300	668.9	



(a) Case 1 (no consideration on uncertainty)



(b) Case 2 (consideration on uncertainty)

Fig. 5. Change of soil classification result

1차원 등가선형해석 프로그램은 지층두께, 단위중량, 전단파속도, 동적물성과 같은 물성들을 입력해 주어야 한다. 여기서 단위중량은 흙의 종류에 따라 다르게 적용하였으며 일반적으로 알려진 흙의 종류별 단위중량의 범위를 참고하여 자갈 섞인 모래의 경우,  $1.8 \sim 2.0t/m^3$ , 점토질 실트의 경우  $1.6 \sim 1.9t/m^3$ , 실트질 모래와 모래의 경우  $1.8 \sim 2.0t/m^3$ , 점토의 경우  $1.7 \sim 1.9t/m^3$ , 풍화암의 경우  $1.9 \sim 2.2t/m^3$ 의 범위에서 평균값을 이용하였다.

Fig. 7은 지반응답해석 시 입력지진 응답스펙트럼으로 국내 표준 설계응답스펙트럼을 만족하고 있음을 보여주고 있으며 이 연구에서는 다양한 지반정보 이용 시의 지반물성의 불확실성을 분석한 만큼 입력지진에 의한 불확실성을 최소화하기 위해 표준응답스펙트럼을 만족하는 단주기 특성의

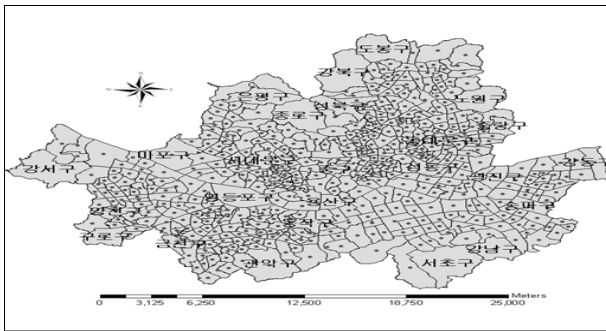


Fig. 6. Locations of site investigations in S city

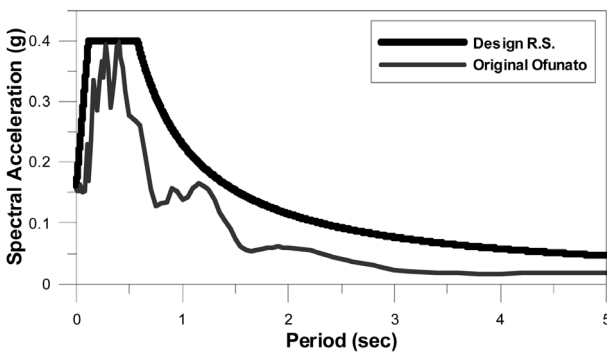


Fig. 7. Comparison of response spectrum

Table 6. Dynamic material properties for site response analysis

Ground Characterization	Suggester	
	Normalization Shear Factor ( $G/G_{max}$ )	Damping Ratio (D)
Sandy Soil.	Seed & Idriss (Upper bound)	Seed & Idriss (Upper bound)
Silty Sand	Seed & Idriss (Upper bound)	Seed & Idriss (Upper bound)
Clay	Idriss (1990)	Seed & Sun (1989)
Gravel	Seed et al.	Seed et al.
Bed Rock	Schnabel & Seed (1973)	Schnabel & Seed (1973)

Ofunato 지진기록을 보정하여 이용하였다.

또한 지반응답해석 시 이용된 동적물성은 Earthquake Site Response Analysis Interpretation Through the Round Robin Test(Korean Geotechnical Society, 2010)의 내용에 기초하였으며 그 내용을 요약정리하면 Table 6과 같다. 이때 입력지진의 가속도 수준은 현재 국내 설계기준에서 제시하고 있는 500년 재현주기인 0.11g, 1000년 재현주기인 0.154g, 2,400년 재현주기인 0.22g로 변화하여 입력하였다.

이상의 정보가 입력되어 지반응답해석을 수행하게 되면 지층별 최대가속도 곡선을 획득할 수 있으며, 이로부터 Eq. (3), (4)와 같이 지진에 의한 전단응력비를 산정할 수 있다.

$$\frac{(\tau_d)_{max}}{\sigma_v} = 0.65 \times \frac{a_{depth}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma_v} \quad (3)$$

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

여기서  $a_{depth}$  = 해석깊이에서의 최대가속도

$a_{bedrock}$  = 기반암에서의 최대가속도

$S$  = 지반증폭계수,  $g$  = 중력가속도

$\sigma_v$  = 전응력,  $\sigma_v'$  = 유효응력이다.

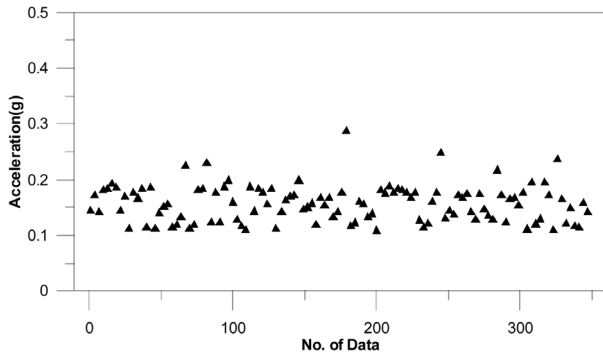
Eq. (3)은 지반응답해석을 이용하는 경우로 S시의 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같으며, Eq. (4)는 기반암에서의 가속도와 Table 3의 지반종별 지반증폭계수를 이용하는 경우이다.

이 연구에서 이상과 같은 조건으로 지반응답해석을 수행한 결과를 나타내면 Fig. 8과 같다. 이때 지반응답해석을 수행한 시추공은 347개소로 지반조사자료상의 시추깊이가 5m 이내인 지반 175개소는 해석대상에서 제외하였다.

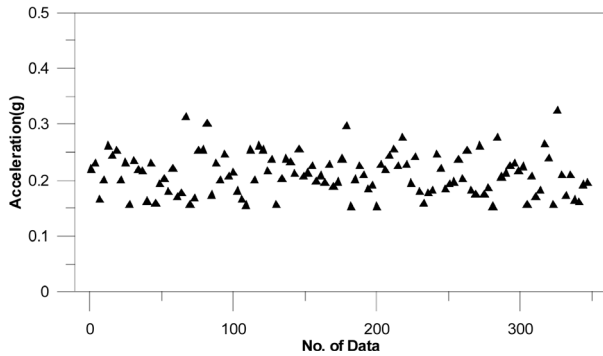
## 4.2 지반증폭계수 검토

지반조사자료에 대한 분석을 통해 지반분류를 수행하고 이를 기초로 한 Table 3의 지반분류별 지반증폭계수와 S시 시추공 정보 374개소에 대한 지반응답해석 결과를 확률분석하여 비교한 결과, Table 7과 8과 같은 결과를 나타내었다.

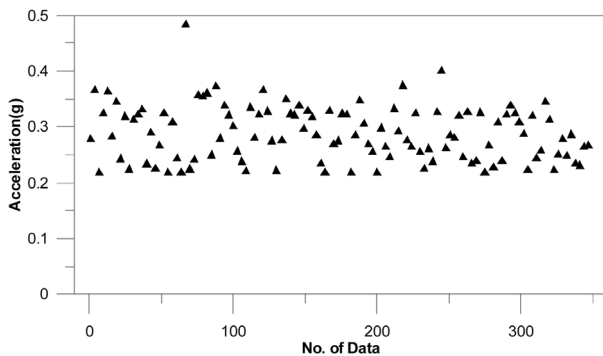
Table 7과 8에서 Case 1의 경우, SC지반에서는 지반응답해석의 가속도 평균보다 낮게 과소평가가 되었고, SD지반에서는 지반응답해석의 가속도 평균값을 넘어선 것으로 나타났다. Case 2의 경우에는 SC지반에서는 지반응답해석의 지반증폭이 설계시방상의 지반증폭계수보다 평균적으로 1.1배 높은 것으로 나타났으며, SD 지반에서는 지반응답해석



(a) Acceleration 0.11 g



(b) Acceleration 0.154 g



(c) Acceleration 0.22 g

Fig. 8. Results of site response analysis (S city)

Table 7. Amplification ratios (Case 1)

Case 1		0.11 g	0.154 g	0.22 g
SC	Amplification Coefficient	1.18		
	Site response analysis Amplification	1.44	1.39	1.33
SD	Amplification Coefficient	1.45		
	Site response analysis Amplification	1.34	1.23	1.13

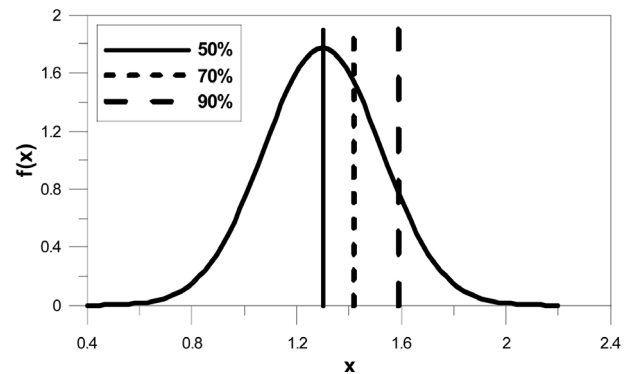
Table 8. Amplification ratios (Case 2)

Case 2		0.11 g	0.154 g	0.22 g
SC	Amplification Coefficient	1.18		
	Site response analysis Amplification	1.33	1.31	1.26
SD	Amplification Coefficient	1.45		
	Site response analysis Amplification	1.49	1.42	1.36

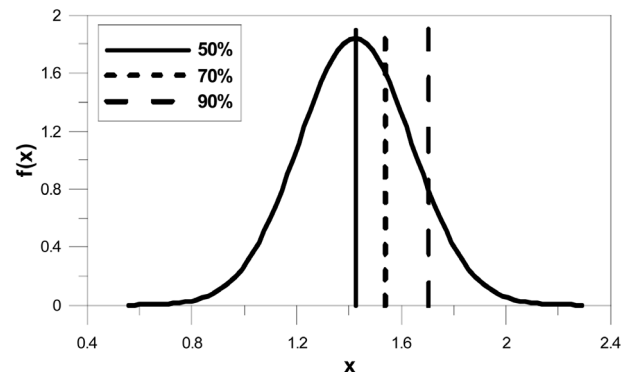
의 지반증폭이 설계시방상의 지반증폭계수와 유사한 것으로 나타났다. Table 7과 8에서의 차이점은 Case 1의 경우, SC지반의 지반증폭이 SD지반보다 크게 나타난 것으로 이는 시추종료 후의 지반물성을 임의로 가정하는 과정에서 지반의 불확실성이 크게 반영된 점에 기인한 것으로 판단된다. Case 2의 경우에는 Case 1과는 달리 SD지반이 SC지반보다 확연하게 큰 것으로 나타나 일반적으로 SD지반이 SC지반보다 지반증폭이 큰 점을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 이상의 비교·분석으로 향후 지반증폭계수를 이용한 액상화 관련해석 시에는 지반분류 시 시추조사 후의 지반정보를 추정하는 기존의 방법보다는 시추조사된 자료만을 토대로 지반분류를 수행하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

### 4.3 지반증폭계수의 제안

이 연구에서는 광역지역의 액상화 위험도 작성에 이용가능한 지반증폭계수의 제안을 위해 지반종류별 지반증폭의 경향을 합리적으로 반영하는 것으로 나타난 Case 2의 지진 가속도별 결과 모두를 종합하여 표준정규분포를 분석하였다. 이때 500년 재현주기인 0.11g, 1,000년 재현주기인 0.154g, 2,400년 재현주기인 0.22g에 대한 모든 결과를 정규화하여 지반증폭비로 나타내었으며 그 결과, 표준정규분포곡선의 전체면적에 대한 50%, 70%, 90% 시의 값을 Fig. 9와 같이 나타



(a) SC Site



(b) SD Site

Fig. 9. Reliability of SC site & SD site

내었다. 이때 면적비는 하위구간부터의 계산된 면적이다.

Fig. 9의 결과를 정리하면 Table 9와 같다.

#### 4.4 광역지역 액상화 위험도 작성 및 비교

이 연구에서는 Table 9에 나타난 표준정규분포 곡선의 면적비 50%, 70%, 90% 시의 지반증폭계수에 대한 타당성 검토를 위해 Fig. 1의 액상화 위험도 작성요령에 준하여 지진가속도별 액상화 위험도를 작성하였다. 이때 각 신뢰도별 지반증폭계수를 이용하여 산정한 액상화 가능성 지수와 지반응답해석을 통해 산정한 액상화 가능성 지수를 수치지도에 나타내어 비교하였다. 여기서 액상화 평가지수는 Eq. (1)

Table 9. Site Amplification Coefficient by area ratio of standard normal distribution curve

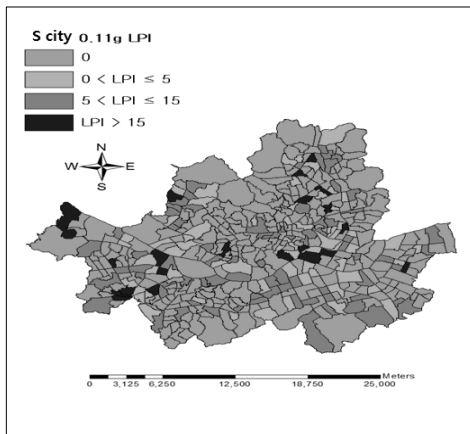
Area ratio	SC	SD
50%	1.30	1.42
70%	1.42	1.54
90%	1.59	1.70

을 통해 산정하였으며 액상화 평가 깊이별 안전율이 1보다 크면 그 깊이에서의 LPI는 0으로 간주하였다.

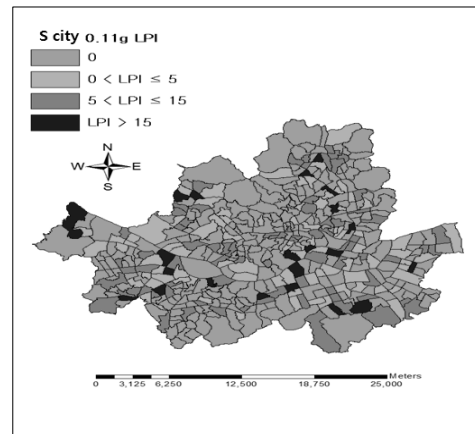
Fig. 10~12에 나타난 바와 같이 지진가속도별 액상화 위험도들을 비교해 보았을 때, 면적비 50%, 70%, 90%의 액상화 위험도 중 50% 시의 액상화 위험도가 지반응답해석결과와 가장 유사한 반면, 70%와 90%의 경우에는 지반증폭계수가 상대적으로 커짐에 따라 이로 인해 지진에 의한 전단응력비 또한 크게 산정되어 전반적으로 액상화 가능성지수가 크게 산정되어 지도상에 나타난 것으로 판단된다.

이상의 비교로부터, 국내 액상화 위험도 작성에 적합한 지반증폭계수는 Case 2와 같이 시추종료까지의 지반정보를 이용하여 지반분류를 수행한 후, 면적비 50%, 즉 평균값을 지반증폭계수로 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 다만 SD지반의 지반증폭계수의 경우에는 1.42로 국내 내진설계기준의 지반증폭계수 1.45와 큰 차이가 없으므로 현 설계시방의 내용을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

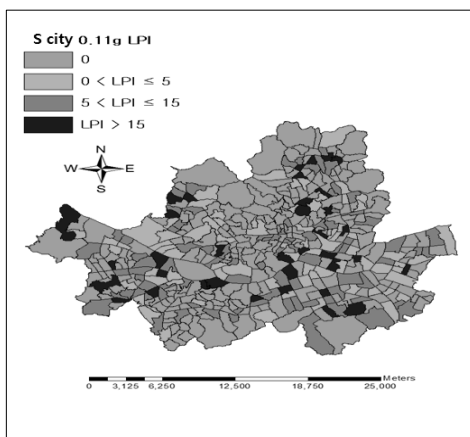
이상의 내용을 정리하여 나타내면 Table 10과 같다.



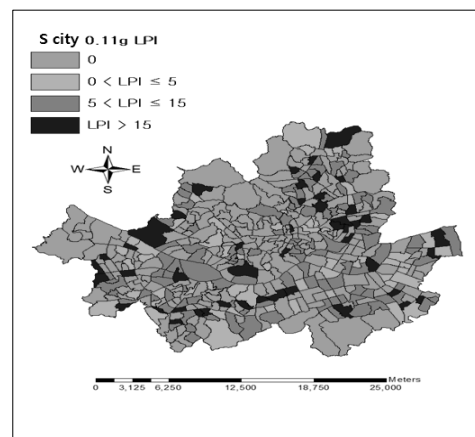
(a) Site response analysis



(b) Site amplification coefficient 50%



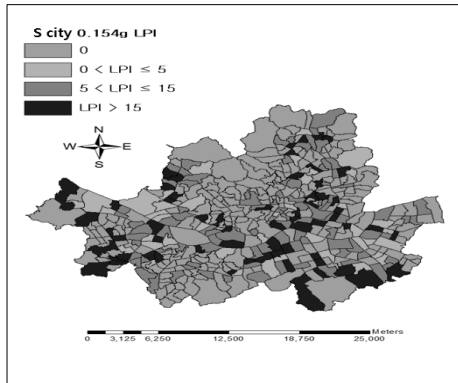
(c) Site amplification coefficient 70%



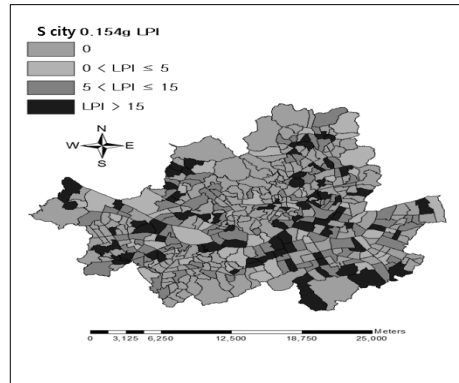
(d) Site amplification coefficient 90%

Fig. 10. Liquefaction hazard map for maximum acceleration 0.11 g

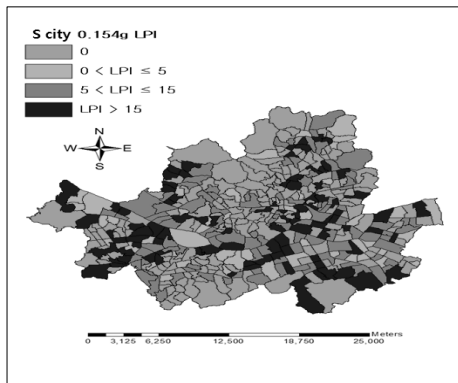




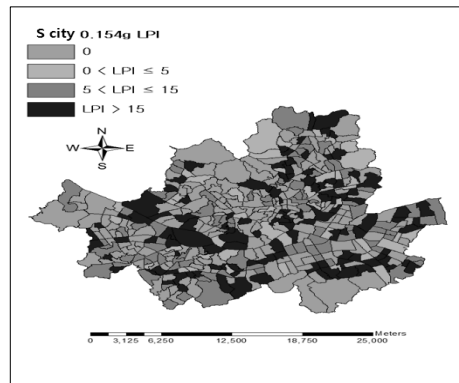
(a) Site response analysis



(b) Site amplification coefficient (50%)

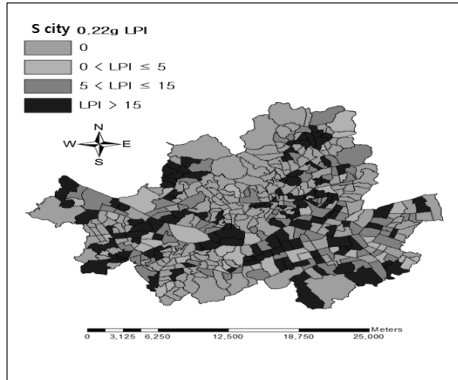


(c) Site amplification coefficient (70%)

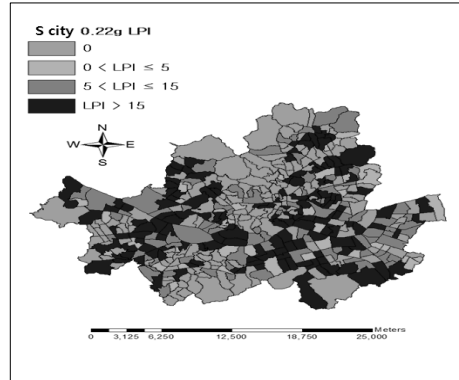


(d) Site amplification coefficient (90%)

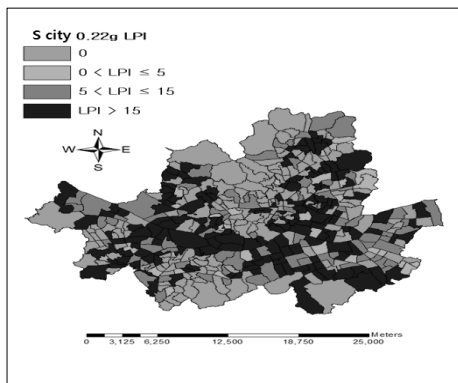
Fig. 11. Liquefaction hazard map for maximum acceleration 0,154 g



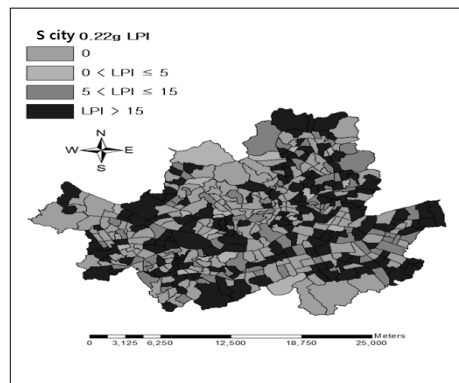
(a) Site response analysis



(b) Site amplification coefficient (50%)



(c) Site amplification coefficient (70%)



(d) Site amplification coefficient (90%)

Fig. 12. Liquefaction hazard map for maximum acceleration 0,22 g

Table 10. Proposal on site amplification coefficients in Korea (SC & SD soil)

Site	National site Amplification Coefficient	New Site Amplification Coefficient
SC	1.18	1.30
SD	1.45	1.45 (No change)

## 5. 결 론

본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 광역지역 액상화 위험도 작성을 위해 지반조사 Big Data 를 이용하는 경우, 지반정보의 불확실성을 고려하여 시추종료 깊이 이후의 지반정보를 처리하는 2가지 경우 (불확실성을 고려하지 않고 시추종료 이후 30m까지의 지반조사결과를 시추종료값과 동일하게 가정한 경우는 Case 1, 불확실성을 고려하여 시추종료까지의 자료만을 고려한 경우는 Case 2)로 구분하여 지반응답해석을 수행하고 이 결과에 대한 확률분석을 수행한 결과, 지반의 불확실성을 고려한 경우가 지반분류에 따른 지반증폭경향을 합리적으로 표현하는 것으로 나타났다. 이로부터 향후 지반증폭계수를 이용한 액상화 관련해석 시에는 지반분류 시 시추조사 후의 지반정보를 추정하는 방법 보다는 시추조사된 자료만을 토대로 지반분류를 수행하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.
- (2) 광역지역에 맞는 새로운 지반증폭계수의 제안을 위해서 모든 지반응답해석 결과들을 정규화하고 표준정규분포 곡선의 면적비 50%, 70%, 90%에 해당하는 지반증폭계수를 산정하여 가속도에 따른 LPI 액상화 위험도를 작성 비교하였다. 비교·분석한 결과, 면적비 50% 시의 액상화 위험도가 지반응답해석 결과를 이용한 위험도와 가장 유사한 것으로 나타났다.
- (3) 면적비 50% 시의 지반증폭계수가 가장 지반응답해석 결과에 따른 위험도를 효과적으로 반영하므로 이때의 지반증폭계수 SC지반에서 1.30를 사용하는 것이 바람직하며 SD지반의 경우에는 1.42로 현재 국내 내진시방에서 사용하는 1.45와 큰 차이가 없으므로 기존의 값을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (4) 이 연구를 통해 액상화 위험도 작성 시 제안된 지반증폭계수를 사용하는 것이 신뢰성을 확보함에 따라 우리나라와 같이 지진피해자료가 많지 않은 중진국가에서 광역지역의 액상화 위험도를 작성할 경우, 위험도 작성 시간을 효과적으로 단축할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업단(자연피해 예측 및 저감 연구 개발사업)의 지원으로 수행한 ‘지진 시사면붕괴 등 지반피해 예측기술개발’ [NEMA-지진-2012-2]과제의 성과입니다.

## References

1. Beetham, R. D., Begg, J. G., Barker, P., Levick, S., Beetham, J. (2011), Assessment of liquefaction and related ground failure hazards in Palmerston North, Consultancy Report, GNS Science, Wellington, New Zealand, pp. 8~25
2. Song, B. W. (2010), Determination on Liquefaction with Ground Natural Period, Journal of the Korean Geo-Environmental Society Fall Conference (10th Anniversary) pp. 459~467
3. European Committee for Standardization (1998), Eurocode8, Report, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, pp. 33~35
4. Heidari, T. and Andrus, R.D. (2010), mapping Liquefaction Potential of Aged Soil Deposits in Mount Pleasant South Carolina, Engineering Geology, Vol. 112, Issues. 1~4, pp. 1~12.
5. 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.
6. 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.
7. Iwasaki, T., Tokida, F., Tatsuoka, K., Watanabe, S. and Yasuda, S. (1978b), Microzonation for Soil Liquefaction Potential using Simplified Methods, Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation, National Science Foundation UNESCO, Seattle, W.A., pp. 1319~1330.
8. JGS (1999), Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Revised Version), The Japanese Geotechnical Society, Tokyo, Japan, pp. 72~99.
9. Hwang, J. T., Lee, J. K. and Shin, E. C. (2013), A Study on the Applicability of Arias Intensity Liquefaction Assessment, Journal of the Korean Geo-Environmental Society Vol. 14, pp. 13~19.
10. Kim, S. I., Park, I. J. and Choi, J. S. (2000), A Study on the Assessment of Liquefaction Potential in Korea, Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol. 20, No. 2-C, pp. 129~139 (in Korean).
11. Korean Geotechnical Society (2010), Earthquake Site Response Analysis Interpretation Through the Round Robin Test, Special Publication No. 2, Goomisekwan, pp. 31~33 (in Korean).
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. Kwak, C. W. (2001), A Study on the Liquefaction Hazard Microzonation at Reclaimed Ports and Harbors in Korea, Master's thesis, Yonsei University. pp. 20~81 (in Korean).
14. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs & Korea Infrastructure Safety Corporation (2011 Report), Korea Infrastructure Safety Corporation, pp. 31~50.
15. Monge, O., Chansagneux, D. and Mouroux, P. (1998), Methodology for Liquefaction Hazard Studies: New Tool and Recent Application, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 17, pp. 415~425.
16. 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).
17. Per B. Schnabel, H. Bolton Seed. (1973), Accelerations in rock for earthquakes in the western United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, No. 2, pp. 501~516
18. Seed, H. B., Tokimatsu, K. and Harder, L. F. (1985), Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation, *Journal of Geotechnical engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1425~1445.
19. 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).
20. 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).
21. Todorovsak, M. I. and Trifunac, M. D. (1999), Liquefaction Opportunity Mapping via Seismic Wave Energy, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 12, pp. 1032~1042.