

액상화 평가를 위한 지층심도DB 구축 방안

Soil Depth Information DB Construction Methods for Liquefaction Assessment

강 병 주¹⁾ · 황 범 식²⁾ · 김 한 샘³⁾ · 조 완 제[†]

ByeongJu Gang · Bumsik Hwang · Hansam Kim · Wanjei Cho

Received: January 5th, 2019; Revised: January 18th, 2019; Accepted: January 24th, 2019

ABSTRACT : The liquefaction is a phenomenon that the effective stress becomes zero due to the rapidly accumulated excess pore water pressure when a strong load acts on the ground for a short period of time, such as an earthquake or pile driving, resulting in the loss of the shear strength of the ground. Since the Geongju and Pohang earthquake, liquefaction brought increasing domestic attention. This liquefaction can be assessed mainly through the semi-empirical procedures proposed by Seed and Idriss (1982) and the liquefaction risk based on the penetration resistance obtained from borehole DB and SPT. However, the geotechnical information data obtained by the in-situ tests or boring information fundamentally have an issue of the representative of the target area. Therefore, this study sought to construct a ground information database by classifying and reviewing the ground information required for liquefaction assessment, and tried to solve the representative problem of the soil layer that is subject to liquefaction evaluation by performing spatial interpolation using GIS.

Keywords : Earthquake, Liquefaction, GIS, Geotechnical database, Cross - Validation

요 지 : 액상화란 느슨한 사질토 지반에서 지진과 같은 큰 진동하중이 발생하여 과잉간극수압이 급격히 증가해 전단강도를 상실하는 현상으로 국내 포항에서 발생한 액상화 현상과 더불어 그 관심이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 액상화 평가는 주로 Seed and Idriss(1982)가 제시한 반경험적 방법을 통해 수행할 수 있으며 시추공 DB와 SPT에서 얻어진 관입저항력을 기초로 액상화 위험을 평가할 수 있지만 획득된 시추공 DB는 일정 구역을 대표하지 못하는 문제를 내재하고 있다. 따라서 본 연구는 액상화 평가의 필요한 지반정보를 분류 및 검토하여 지반정보의 DB구축방안을 모색하고 지리정보시스템(GIS)을 활용하여 공간보간을 수행해 액상화 평가 대상이 되는 지층의 대표성 문제를 해소하고자 하였다. 액상화 발생이 예상되는 지층의 두께를 정의하는 방안에 따라 세 가지 지층심도DB구축 방안을 제시하였고 교차검증을 통해 제시한 구축방안의 정밀도를 비교, 분석하여 액상화 평가에 적합한 지층심도DB구축 방안을 제시하였다.

주요어 : 지진, 액상화, GIS, 지반정보DB, 교차검증

1. 서 론

액상화란 포화된 느슨한 사질토 지반에 지진 등의 동하중이 발생하여 과잉간극수압이 생성되고 유효 응력이 감소하여 전단강도를 완전히 상실하는 현상을 의미한다(Song et al., 2018).

이러한 액상화는 액상화 현상이 발생 가능한 깊이에서 안전율로 평가할 수 있으며 많은 연구자들이 액상화 가능지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 도입하여 액상화 가능성을 정량화하여 액상화 현상을 연구하였다(Seo et al., 2009).

국내에서는 해안, 항만 지역의 매립지를 중심으로 액상

화 관련 연구가 수행되어왔고 최근 포항에서 일어난 지진으로 발생한 액상화로 재해도 관점에서의 액상화 연구 또한 활발히 진행되고 있다(Park & Kim, 2013; Sitharam et al., 2004; Seo et al., 2012).

액상화 평가는 일반적으로 지표로부터 20m~25m 깊이까지 느슨한 사질토 지층을 대상으로 수행되므로 실질적인 액상화 평가 이전에 액상화 발생 가능한 지층을 먼저 정확히 파악하는 것이 중요하다.

하지만 일반적으로 지표면 아래 획득 가능한 지층정보는 시추를 통해 얻어진 평면상의 1차원적인 점에 대한 심도별 정보이기 때문에 근본적으로 해당 지역의 대표성 문제를 내재하고 있다. 일반적으로 앞서 획득된 지반정보는

1) Graduated Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) Ph.D. Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

3) Senior Researcher, Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

† Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University (Corresponding Author : jei0421@dankook.ac.kr)

단순한 보간 혹은 평균값이나 추정식을 통해 평가에 적용되고 있으며 이러한 지반정보의 대표성의 문제는 지리정보시스템(GIS)과 지구통계학적인 방법을 활용한 공간보간을 통해 해당 지역에 존재하는 지반정보의 대표성 문제를 해소할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 액상화재해도를 위한 연구에 일환으로 액상화 평가 설계기준에 근거하여, 액상화 평가에 필요한 지반정보 중 액상화 발생 가능 지층을 분류 및 선별하고 공간보간을 통해서 보다 정밀한 지층 두께를 파악하고자 하였다.

국내 대표 매립지역인 세 곳을 분석대상 지역으로 선정하고 두께를 정의하는 세 가지 구축방안을 제시하여 구축방안에 따르는 정밀도를 비교, 분석하였다. 또한 시추를 통해 획득한 지반정보를 공간보간을 수행하는데 보다 적합한 구축방안을 제시하여 액상화 평가에 최적화된 지반정보DB 구축방안을 제안하고자 하였다.

2. 액상화 평가와 지반정보

2.1 액상화 평가

일반적으로 액상화는 시추를 통한 지반정보를 통하여 평가할 수 있는데, 그중 SPT-N값과 CPT를 활용한 지반의 관입저항값으로 액상화 발생 여부를 평가할 수 있다. 실내 시험으로는 반복삼축압축시험과 반복단순전단시험을 통하여 보다 더 정밀한 액상화 평가를 수행할 수 있지만 현장에서 불교란 시료를 확보해야 하는 조건과 선행조건이 충족되어야 실내시험에 부합하는 결과 값을 획득할 있는 조건을 가지고 있다. 현장에서 불교란 시료를 채취하는 것은 매우 까다로운 작업이므로 현 국내 실정으로는 모든 설계에 현장의 불교란 시료를 채취하여 시험을 수행하기에는 어려운 실정이다(Saeed-ullah et al., 2016).

따라서 현장시험을 통한 시추정보를 활용하여 액상화 안전율을 계산하는 것이 일반적이며 국토교통부의 국내 도시철도 내진설계 기준에서는 N값을 활용한 간편법을 제시하

고 있다(Seed & Idriss, 1982; MLIT, 2017).

지진으로 발생하는 반복하중을 유효상재하중으로 정규화시킨 응력을 반복전단응력비(Cyclic stress ratio, CSR)라 하고, 이는 지진 규모에 따라서 지반에서 액상화를 유발시키는 응력이라고 할 수 있다. 이러한 액상화를 유발시키는 응력에 의해서 액상화 발생시점에 CSR를 반복저항응력비(Cyclic resistance ratio, CRR)라 하며 이는 지반의 저항치를 의미한다.

CSR값과 CRR값을 통하여 액상화 발생에 따르는 안전율을 계산할 수 있으며 지진에 따르는 CSR값이 CRR값을 초과한다면 액상화 발생을 의미한다. 이러한 안전율의 개념을 해당 액상화 발생 지층의 깊이 별로 가중치를 더해 액상화 발생 가능성을 정량화시킨 지표가 액상화 가능지수(Liquefaction potential index, LPI)이며 이를 통하여 분석하고자 하는 영역에서의 액상화 위험도를 평가할 수 있는 재해도 작성이 가능하다.

2.2 액상화 평가를 위한 지반정보

국내 도시철도 내진 설계 기준(MLIT, 2017), 도로교설계 기준(2008)에서는 액상화 평가가 생략 가능한 조건으로 여섯 가지를 제시하고 있으며 Table 1은 여섯 가지 사항을 정리한 표이다. 가능한 조건들에서 유추할 수 있듯이 액상화는 느슨한 사질토, 지하수위 하부 지반, N값이 20 이하인 지반, 대상지반심도가 20m 이상인 지반과 일정 세립토 함유량 조건 등을 가지는 지반에서 액상화 현상이 발생함을 파악할 수 있다.

따라서 앞서 제시한 조건을 근거로 본격적인 액상화 평가에 앞서서 평가 대상영역에서의 지반정보를 정확히 파악하여 액상화 평가를 수행하는 것이 중요할 것이다. Table 2는 국내 도로교설계기준(2008)과 도시철도설계기준(MLIT, 2017)에 근거하여 액상화 평가에 필요한 지반정보 항목들을 정리한 표이며 Table 3은 시추공 정보에서 간편법으로 액상화 평가를 수행할 때 필요한 지반정보를 정리한 표이다.

Table 1. Cases where the liquefaction assessment can be skipped under current design provision

Design criteria	Details of subject
Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT, 2017)	① Ground water above ground
	② Ground penetration test value (SPT-N value) on the columnar surface is 20 or more
	③ Ground with a depth of 20m or more
	④ PI of 10 or more and a clay component of 20% or more
Korean Highway Bridge Design Code (2008)	⑤ Content of clay is more than 35%
	⑥ Ground with relative density of 80% or more

Table 2. Geotechnical information required for the liquefaction assessment

Geotechnical information	Procedure of liquefaction assessment		Note
	Simplified procedure	Detailed procedure	
Geotechnical properties (Specific gravity, Classification of soil, Atterberg limit, Water content, Grain-Size Distribution, Relative density)	Sieve analysis, Water content test, Specific gravity test, Liquid and plastic limit test		
Thickness of liquefaction	Sounding (Standard penetration test, Cone penetration test. etc)		Liquefaction potential index
Ground water table	Well-point test, Stand pipe test, Piezometer test etc		
Maximum horizontal surface acceleration (a_{max})	Earthquake response analysis (using the proshake program etc)		Cyclic shear stress ratio (CSR)
Resistance of penetration (SPT-N value, q_u)	Standard penetration test, Cone penetration test		Cyclic resistance ratio (CRR)
Cyclic resistance ratio (CRR)	SPT, CPT	Cyclic simple shear test Cyclic triaxial test	Cyclic resistance ratio (CRR)
Shear modulus, Damping ratio	Resonant column test, Cyclic triaxial test, Torsional shear test		

Table 3. Summary of soil properties for simplified procedure

Subject	Details		Note
Project	Project name, code, location and digital map		
Location	Name of location, coordinate		
Boring log	General	Boring data, boring equipment, boring method, driller, inspector	
	Layer information	Layer classification, detailed description of soil layer (color, major components), thickness of layer	
Lab test	In-situ soil information	Void ratio, dry/wet unit weight, water contents	
	General	USCS, weight passing by #200 sieve, coefficient of uniformity and curvature, plasticity index, liquid limit, specific gravity	
	Permeability	Vertical permeability, horizontal permeability	
	Compaction	Max, dry unit weight, optimum moisture contents	
Field test	SPT	N profile	Boring log
	Shear wave velocity	Shear wave velocity profile	
	CPT	Penetration of resistency	
Layer	Thickness of layer which has a possibility of liquefaction		

3. 지층심도DB 구축과 공간보간

층은 대부분 모래지층이었으며 이후 발견된 지층은 실트 혹은 점토로 분포하였다.

3.1 분석 대상 지역

본 연구에서는 액상화 평가를 위한 지반정보DB 구축을 위해 국내 대표 해안매립지역으로 인천 남항 컨테이너 터미널, 인천 송도 간척지, 새만금 간척지를 분석대상지역으로 선택하였다. Fig. 1은 인천항 컨테이너 터미널, Fig. 2 송도 매립지, Fig. 3은 새만금 간척지를 나타내며 분석에 사용된 시추공들을 확인할 수 있다. Table 4는 각 분석지역의 영역 크기와 시추공 개수를 정리하였다.

편의를 위해 본 논문은 인천항 컨테이너의 분석지역을 Area 1, 송도 간척지의 분석지역을 Area 2, 새만금 간척지의 분석지역은 Area 3으로 지칭하여 서술하였고 분석영역이 모두 해안에 위치하므로 지반은 모두 포화상태에 있다고 가정하였다. 분석지역은 매립지역으로 첫 번째로 출현한 지



Fig. 1. Boreholes location in Incheon's harbor (Area 1)

Table 4. Summary of target area

Area of analysis	The number of boreholes	Size (km ²)
Area 1 (Incheon's harbor)	37	0.85 km × 0.85 km
Area 2 (Reclaimed land of Songdo)	126	3.0 km × 1.6 km
Area 3 (Saemangeum)	50	5.92 km × 2.00 km



Fig. 2. Boreholes location in reclaimed land of Songdo (Area 2)



Fig. 3. Boreholes location in Saemangeum (Area 3)

3.2 공간보간법 kriging

본 연구에서는 지구통계학적 방법 중 하나인 kriging을 통해 시추공 정보를 공간보간하여 1차원 정보를 2차원 정보로 구축하고 지역의 대표성의 문제를 보완하고자 하였다. 여기서, kriging이란 예측지점에서 특성 값을 이미 값을 알고 있는 주위 값들의 가중선형조합으로 예측하는 공간보간법이며 Eq. (1)로 표현가능하다.

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) [Z(u_{\alpha}) - m(u_{\alpha})] \quad (1)$$

여기서, λ_{α} 는 α 번째 표본 자료에 부여하는 가중치, $m(u)$ 와 $m(u_{\alpha})$ 는 각 확률 변수 $Z(u)$ 와 $Z(u_{\alpha})$ 의 기댓값 혹은 지역의 평균값이다.

기댓값 혹은 지역 평균값인 $m(u)$ 를 정의하는 방식에 따라 크리깅 종류가 상이하며 크게 단순 크리깅(Simple kriging), 정규크리깅(Ordinary kriging), 일반 크리깅(Universal kriging) 등으로 분류할 수 있다. Kim et al.(2010)는 지층분포추정을 위하여 단순 크리깅, 정규 크리깅, 일반 크리깅을 적용하여 각각 공간보간을 수행하였고 그 결과 정규크리깅을 통하여 지층 두께를 추정하는 방법이 가장 합리적인 방법임을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 Ordinary kriging을 활용하여 액상화 발생지층의 두께를 산출하였다.

3.3 지층심도DB 구축방안

지층과약을 위하여 일반적으로 시추를 통해 얻을 수 있는 지층정보는 수준기준면으로부터 지층 상부까지 거리인 표고 정보이다. 각 지층의 시작지점과 종결지점의 차이 값을 통해 지층의 두께를 결정할 수 있지만, 일정한 영역에서 여러 시추공 정보를 검토해보면 동일한 심도에서 같은 성질을 가지는 지층을 발견하는 경우는 드물다.

이때 해당 지층이 출현하지 않는 시추공 위치의 지층 두께 값을 0으로 정의하여 그 시추공 정보의 좌표 값을 기지점으로 활용할 수 있다. 따라서 본 논문의 기지점의 의미는 시추공 정보의 좌표 x, y 값을 포함하고 두께 값이 0인 시추공 정보를 의미할 수 있다.

앞선 개념을 도입하여 분석지역의 시추공 정보를 모두 비교하여 그 분석지역에서 가장 빈번히 출현하는 대표지층을 선별하는 동시에 출현하지 않는 지층을 0으로 정의하여 획득된 지층정보를 가공한다.

이렇게 가공된 정보를 통하여 Gang et al.(2018)는 해안 지역 매립지역에 존재하는 준설토의 지층과약을 수행하였으며 두께를 통한 준설토의 물량산출이 가장 정밀한 정보 구축방안임을 확인하였다. 이는 두께를 활용한 정보 구축이 기지점을 포함한 상태에서 공간보간이 수행되는 것을 의미하며 이는 제한된 분석영역에서 활용할 수 있는 좌표값의 수가 보다 많기 때문이라 판단할 수 있다.

이에 본 연구는 공간보간한 액상화 발생지층을 보다 정

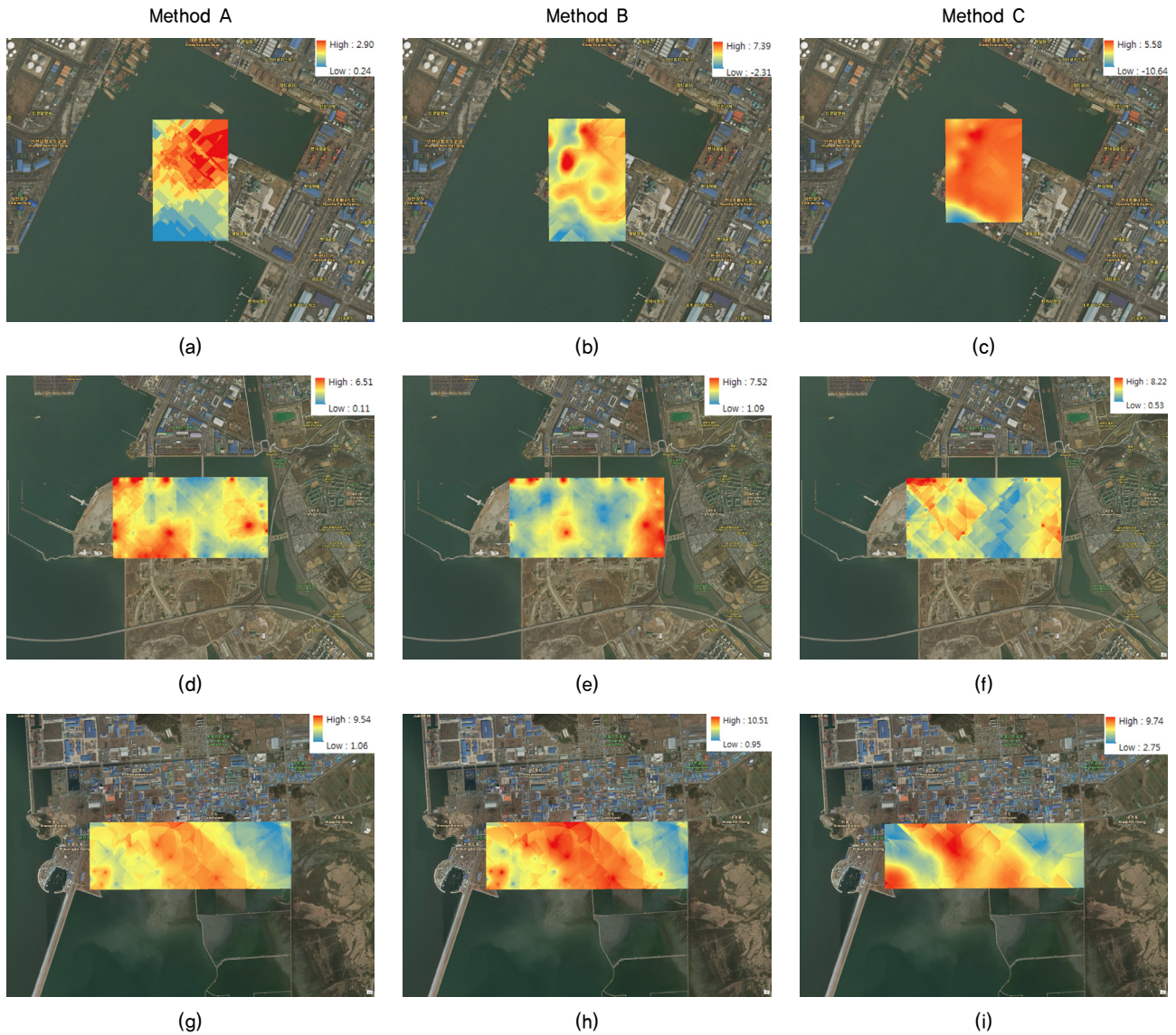


Fig. 4. Results of spatial interpolation in Target areas areas

밀히 파악하기 위해서 분석지역에 시추공들을 모두 비교 분석하여 액상화 평가 대상이 되는 지층을 우선 선별하였다. 또한 그 지층이 출현하지 않는 시추공 정보는 기지점으로 활용하여 액상화 발생지층의 두께를 공간보간하였으며 두께를 정의하는 방법과 kriging을 수행하는 횟수에 따라서 세 가지의 지층심도DB 구축방안 Method A, Method B, Method C를 제시하였다.

① 시추공 정보에서 얻을 수 있는 지층의 두께를 산출한 후 공간보간하여 두께를 산출(Method A) : 지층 두께 값을 산출하는 방안 중 가장 접근하기 용이한 방안이며 공간보간을 수행하기 이전에 획득한 시추공의 지층정보를 통하여 액상화 발생지층의 두께 값을 계산한다. 이때 발견되지 않는 두께 값 또한 0으로 두어 시추공 정보를 기지점으로 활용하고 계산된 두께 값을 공간보간하여 분석지역의 액상화 발생 지층의 두께 값을 산출한다. 이

방안은 kriging을 한 번 수행하기 때문에 정보 처리량이 적어 대략적인 지층파악에 유리할 수 있다. kriging을 통하여 얻어진 값은 각 좌표에 해당하는 정량적인 값으로 변환시키기 위해 Raster file로 변환할 수 있는데 이때, cell size는 5×5로 하여 kriging 결과값을 추출하였다. 이렇게 Raster file로 추출된 지층 두께의 결과 값을 Fig. 4(a), (d), (g)에 나타내었다.

② 시추공 정보의 지표고를 공간보간하고 지층의 종결심도를 공간보간하여 그 차이 값을 통해 두께를 산출(Method B) : Method A는 공간보간을 수행하지 않는 지반정보를 통하여 두께를 산출한 이후 공간보간 하였다면 Method B는 분석지역의 시추공 정보들의 지표면의 표고값들을 공간보간하고 액상화 발생 가능한 지층의 종결심도를 공간보간하여 그 차이값을 계산하여 두께를 파악하는 방안이다. 앞 단락에 서술한 것과 같이 Raster file로 추출한 결과는 Fig.

4(b), (e), (h)에서 확인할 수 있다. Method B는 Method A와 비교하여 지표면의 경향을 포함하고 종결심도의 경향을 포함하기 때문에 실제와 유사한 경향을 가지는 동시에 기지점 또한 활용하여 정밀도 측면에서도 보다 정밀한 지층을 파악할 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 기본적으로 kriging을 두 번 수행하기 때문에 시추공이 증가할수록 정보 처리량이 많아지는 단점이 있다.

- ③ 시추공 정보의 지표고를 공간보간하고 기지점을 활용하지 않는 채 지층의 종결심도를 공간보간하여 그 차이 값을 통해 두께를 산출(Method C): 두 번째 방안과 유사하지만 지층의 종결심도를 공간보간할 때 기지점을 활용하지 않는 채 액상화 발생 가능 지층을 포함하지 않는 시추공을 제외한 후 공간보간을 수행한다. 그 결과는 Fig. 4에서 (c), (f), (i)에서 확인할 수 있다.

4. 지층심도DB 구축방안에 따른 정밀도 분석

4.1 정밀도 비교

본 연구에서는 지층심도DB 구축방안에 따른 정밀도 검토를 위해 교차검증 기법을 적용하였다. 여기서 교차검증이란, 대상영역의 기지점의 자료 가운데 하나의 물리량을 미지 값으로 가정하고 주위에 나머지 자료로부터 이를 공간보간을 통해 예측함으로써 실측된 물리량과 예측된 물리량의 차이를 분석하는 기법으로써 정성적으로 예측값과 실측값의 관계를 확인할 수 있다. 또한 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 활용하여 대상 영역에 대한 지반정보 정밀도를 정량적으로 확인하였다. 여기서, RMSE이란 잔차 제곱의 평균에 제곱근을 취한 것으로 Eq. (2)으로 산출하며 그 값이 작을수록 예측값이 보다 정밀하다는 것을 의미한다.

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

여기서, e_n : 잔차, n : 자료 개수

4.2 지층심도DB 구축방안에 따른 정밀도

구축방안에 따라 교차검증과 예측값과 실제값의 경향을 비교분석하기 위해 x축에는 실측값, y축에는 예측값으로 정의하여 공간보간을 통해 얻어진 실측값과 예측값의 상관관계를 분석하였다. 실측값과 예측값으로 이루어진 좌표값이 1:1-Line 주변으로 분포되어 있다면 이는 실측값과 예측값의 오차가 적다는 것을 정성적으로 판단할 수 있다.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7은 각 분석지역에서 구축방안에 따

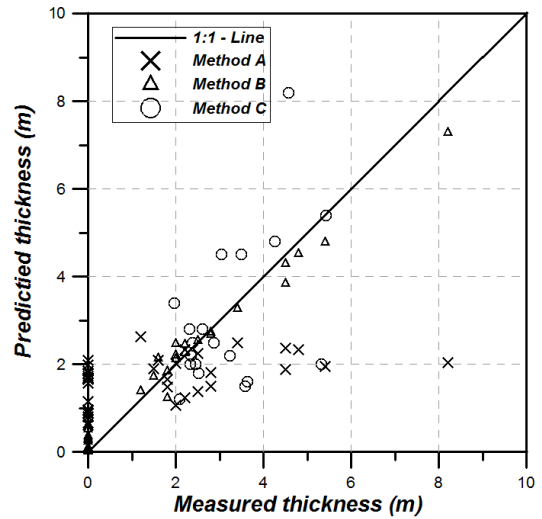


Fig. 5. Correlation between measured value and predicted value in Area 1

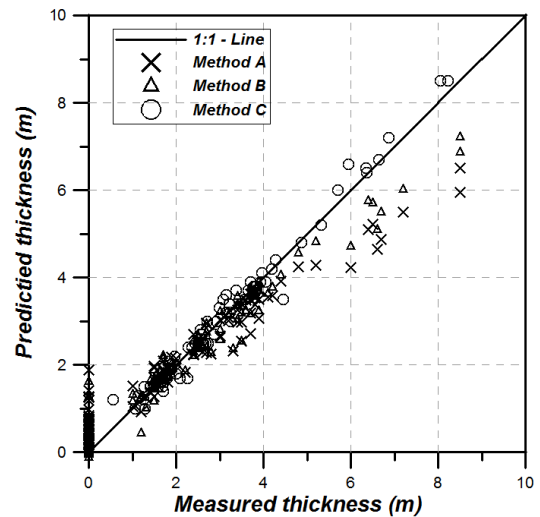


Fig. 6. Correlation between measured value and predicted value in Area 2

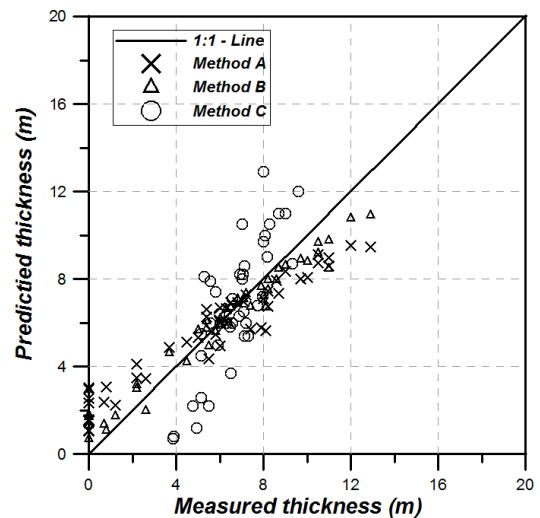


Fig. 7. Correlation between measured value and predicted value in Area 3

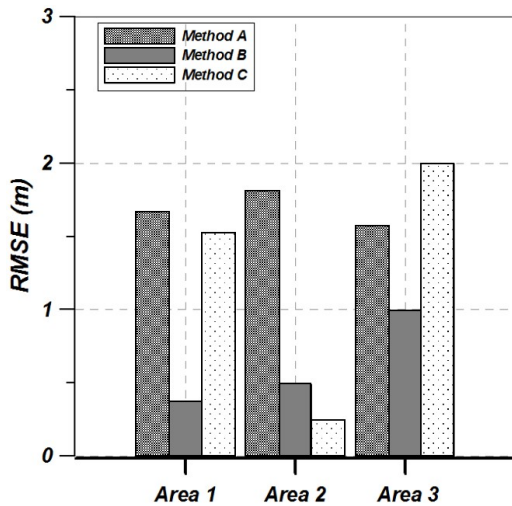


Fig. 8. Average of RMSE with regard to interpolation method in Area 1,2 and 3

르는 예측값과 실측값에 관계를 나타낸 그래프이며 Table 5는 분석지역과 구축방안에 따르는 RMSE(m)를 정리한 표이다. Method A와 Method B를 통해서 예측된 값들 중 y축 상에 위치하는 경우가 발생하는데 이는 실측된 두께 값이 0을 의미하며 기지점으로 활용된 정보를 의미한다. 따라서 y축 값은 두께 값이 0인 지점에서 공간보간을 통해서 얻어진 두께 값이며 이는 공간보간에 따르는 오차를 의미한다. Method A와 Method B의 경우 공간보간을 통해 산출된 두께의 오차는 최대 2m 정도 발생하였으며 Method C의 경우는 최대 3.5m 정도 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Method A 방안은 분석지역에 따라서 RMSE가 대체로 일정한 값을 보이는 것을 확인할 수 있는데 이는 두께 자체 값만을 공간보간하므로 지역의 지표고 경향과 지층의 종결심도의 경향이 반영되지 않는 것이라 판단된다. 이와 비교하여 Method B와 Method C는 지표고와 지층종결심도의 경향을 고려한 방안으로써 두 가지 방안 중 Method B 방안이 예측값과 실측 값의 오차가 보다 적고 RMSE 또한 낮게 산출되어 세 가지 방안 중 가장 정밀한 구축방안임을 확인할 수 있었다.

Method C는 분석지역에 따라 RMSE의 변동이 뚜렷하였으며 Area 2에서는, Method B보다 Method C의 RMSE가 더 낮게 산출되어 Method B의 RMSE가 보다 정밀한 경우를 확인할 수 있었다. 이는 기지점을 활용하여 정밀도를 높

이는 방안이 지층의 두께 산출에 있어서 모든 분석지역에서 유효하지 않다는 것을 의미한다.

또한 종결심도를 가지고 있는 지반정보의 기지점을 포함한다면 정밀도는 상승할 수 있지만 액상화 발생 가능 지층을 완전히 배제할 수 있는 위험을 가지고 있다.

즉 액상화 발생 가능한 지층의 두께 값을 0으로 두고 기지점으로 활용하는 것은 액상화 발생가능성을 지니고 있는 지층의 경계 값을 미처 고려하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 하지만 Method C는 기지점을 제거 후 공간보간하기 때문에 이러한 위험을 사전에 제거할 수 있다. 따라서, 앞선 두 방안을 적용하여 RMSE를 산출한 결과가 유사하다면 Method C를 채택하는 것이 보다 합리적으로 두께를 산출할 수 있을 것이라 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구방안

본 연구는 국내 대표적 매립지역, 인천 남항 컨테이너 터미널, 송도 간척지, 새만금 간척지를 대상으로 하여 액상화 평가를 위한 최적의 지층심도DB 구축방안을 제시하고자 하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 액상화 평가에 활용되는 지반정보들을 Table 2와 같이 간편법과 상세법으로 분류하여 정리하였으며 Table 3과 같이 액상화 평가 중 간편법에서 활용할 수 있는 지반정보DB를 제시하였다.
- (2) 본 연구는 액상화 평가 대상인 지층 두께를 정의하는 방법에 따라서 ① 시추공 정보에서 얻을 수 있는 지층의 두께를 산출한 후 공간보간하여 두께를 산출(Method A) ② 시추공 정보의 지표고를 공간보간하고 지층의 종결심도를 공간보간하여 그 차이 값을 통해 두께를 산출(Method B) ③ 시추공 정보의 지표고를 공간보간하고 기지점을 활용하지 않은 채 지층의 종결심도를 공간보간하여 그 차이 값을 통해 두께를 산출(Method C) 세 가지 지층심도DB 구축 방안을 제시하고 비교 분석하였다.
- (3) 제시한 지층심도DB 구축 방안에 따르는 정밀도 분석을 위해 교차검증과 RMSE를 비교 분석하였다. Fig. 5, Fig.

Table 5. Summary of RMSE

Area	RMSE (m)		
	Method A	Method B	Method C
Area 1 (Incheon's harbor)	1.653	0.368	1.531
Area 2 (Reclaimed land of Songdo)	1.795	0.490	0.244
Area 3 (Saemangeum)	1.556	0.980	2.001

6, Fig. 7은 각 분석지역별 지층심도DB 구축 방안에 따르는 예측 값과 실측값의 관계를 표현한 그래프이다. 정성적인 측면에서 Method B가 Method A와 Method C보다 실측값과 예측 값의 오차의 발생이 가장 적게 발생하는 것을 확인할 수 있었고 Table 5와 Fig. 8을 통해 RMSE 또한 Method B가 분석지역별로 낮게 산출되어 가장 정밀한 DB구축방안임을 확인할 수 있었다.

- (4) Method A 방안은 분석지역에 따라 일정한 RMSE를 보였으며 이는 지표고와 종결심도의 경향을 반영하지 않고 지층 두께 자체만을 공간보간한 결과로 판단된다. Method C 방안은 분석지역별로 RMSE 차이가 크게 발생하였으며 이는 일반적으로 기기점을 활용하지 않기 때문에 Method B보다는 정밀도가 낮고 지역에 따르는 지표고 경향과 시추공 위치에 따라서 영향을 많이 받는 것이라 판단된다. Area 2의 경우, Method B보다 Method C 방안이 보다 RMSE가 높은 것을 확인할 수 있었는데 이는 시추공 정보가 균일하게 사각형 영역으로 분포하였고 기지점으로 활용되지 않는 정보를 제거하여도 공간보간 결과에 따르는 영향을 주지 않는 것이라 판단된다.

액상화 평가를 위한 지반정보 중 액상화 발생 가능 지층의 두께를 구축방안별로 분석 결과, Method B 방안이 가장 정밀한 구축방안임을 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 두께뿐만 아니라 액상화 평가에 필요한 지반정보를 대상으로 공간보간을 통한 신뢰도 분석과 지반정보DB 구축 방안을 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야 대학중점연구소지원 사업의 연구비 지원(NRF-2018R1A6A1A07025819) “ICT 융복합 기존건축물 내진리모델링 기술 개발”에 의해 수행되었습니다.

References

1. Gang, B. J., Hwang, B., S., Park, H. W. and Cho, W. J. (2018), Optimal input database construction for 3D dredging quantification, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol 19, No 5, pp. 23~31 (In Korean).
2. Kim, D. H., Ryu, D. W., Lee, J. H., Choi, I. G., Kim, J. K. and Lee, W. J. (2010), Comparative Studies of Kriging Methods for Estimation of Geo-Layer Distribution of Songdo international City in Incheon, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 5, pp. 57~64 (In Korean).
3. Ministry of Land (2008), Transport and Maritime Affairs, “Korean Highway Bridge Design Code”, Korea Road and Transportation Association (In Korean).
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2017), Urban railway seismic design criteria, pp. 29~40 (In Korean).
5. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1982), Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, *Earthquake Engineering Research Institute*, Oakland, CA.
6. Sitharam, T. G., Govindaraju, L. and Murthy, B. R. S. (2004), Evaluation of liquefaction potential and dynamic properties of silty sand using cyclic triaxial testing, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 5, pp. 423~429.
7. 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. 13, No. 4, pp. 1~13 (In Korean).
8. Seo, M. W., Scott, M. O., Sun, C. G. and Oh, M. H. (2012), Evaluation of liquefaction potential index along western coast of South Korea using SPT and CPT, *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 30, No. 3, pp. 234~260.
9. Saeed-ullah, J. M., Park, D. H., Kim, H. S. and Park, K. C. (2016), Cyclic simple shear test based design liquefaction resistance curve of granular soil, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 32, No. 6, pp. 49~59 (In Korean).
10. Song, Y. W., Chung, C. K., Park, K. H. and Kim, M. G. (2018), Assessment of liquefaction potential using correlation between shear wave velocity and normalized LPI on urban areas of Seoul and Gyeongju, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 2, pp. 357~367.
11. Park, S. S. and Kim, Y. S. (2013), Liquefaction resistance of sands containing plastic fines with different plasticity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, No. 5, pp. 825~830.