

3차원 액상화 위험분석을 위한 GIS Map 구현 방안

이우식¹, 장용구^{2*}

¹한국건설기술연구원 미래융합연구본부, ²한국건설기술연구원 지하공간안전연구센터

Implementation Method of GIS Map for 3D Liquefaction Risk Analysis

Woo-Sik Lee¹, Yong Gu Jang^{2*}

¹Department of Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Underground Space Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요 약 최근 경상북도 포항에서 일어난 강도 5.4 규모의 지진 영향으로 인하여 국내에서도 액상화 현상이 처음으로 발견되었다. 이와 같이 액상화 현상이 발생하면 물과 모래의 일부가 지면 위로 분출하여 공간이 생기게 되므로 지반의 침하, 건물 붕괴, 싱크홀 발생 등의 다양한 위험 상황으로 이어지게 된다. 최근 국내에서도 이와 같은 위험 요인인 액상화 가능지역을 사전에 파악하고자 액상화 위험지도 제작의 필요성이 커지고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 액상화 위험지도 제작을 위해 국토교통부 국토지반정보 통합 DB센터에서 구축한 시추정보를 활용하였으며, 시추정보 데이터베이스 추출 기능과 시추정보를 바탕으로 한 기초데이터 모델링과 3차원 분석 기능을 구현하기 위한 모듈을 개발하였다. 본 연구를 통하여 국토지반정보 통합DB의 효과적인 연동기술을 확보하였으며, 지반 저항치, 액상화 위험지도 등 액상화 위험도 분석을 위한 단계별 3차원 정보 생성이 가능해졌다. 향후, 본 연구에서 개발한 기술을 통해 3차원 액상화 정보 구축을 위한 기반 마련과 액상화 대응체계 구축을 위한 종합적인 의사결정 지원기술로 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

Abstract Recently, the liquefaction phenomenon was first discovered in Korea due to a magnitude 5.4 earthquake that occurred in Pohang, Gyeongsangbuk-do. When liquefaction occurs, some of the water and sand are ejected to the ground, producing a space, which leads to various dangerous situations, such as ground subsidence, building collapse, and sinkhole generation. Recently, the necessity of producing a liquefaction risk map in Korea has increased to grasp potential liquefaction areas in advance. Therefore, this study examined the drilling information from the national geotechnical information DB center at the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport to produce a liquefaction risk map, and developed a module to implement functions for basic data modeling and 3D analysis based on drilling information database extraction and information. Through this study, effective interlocking technology of the integrated database of national land information was obtained, and three-dimensional information was generated for each stage of liquefaction risk analysis, such as soil resistance value and a liquefaction risk map. In the future, the technology developed in this study can be used as a comprehensive decision support technology for establishing a foundation for building 3D liquefaction information and for establishing a response system of liquefaction.

Keywords : Earthquake, Liquefaction, Ground subsidence, Liquefaction risk map, Soil resistance value

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업인 "Tech-lead형 액상화 피해 예측 가치화 시스템 및 고효율·저비용 액상화 보강공법 개발" 연구과제의 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Yong-Gu Jang(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
email: wkddydrn@kict.re.kr

Received March 9, 2020

Revised April 29, 2020

Accepted June 5, 2020

Published June 30, 2020

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 지리적 여건으로 인하여 지진이 빈번히 발생하는 미국 서부와 일본에서 액상화와 관련한 연구가 많이 진행되고 있다. 과거에 발생하였던 규모 7.5의 니가타지진(1964)과 규모 8.3의 알라스카지진(1964)이 액상화의 대표적인 사례이다[1,2]. 특히 니가타지진의 경우, 아파트가 크게 기울어지면서 액상화가 세계적으로 크게 알려지는 계기가 되었다. 최근 우리나라에서도 경주지진(2016), 포항지진(2017)이 연이어 발생함에 따라 국내에서도 지진에 대한 경각심이 높아졌다. 특히, 2017년 11월 15일 경상북도 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진으로, 공원, 도로 등지에서 액상화로 인해 모래와 물이 동시에 지표면으로 분출되는 현상이 국내에서는 처음으로 관찰되었다[3,4]. 그 결과 도로를 비롯한 지상의 각종 시설물들이 침하또는 기울어지는 피해를 입거나 상수도 및 하수도 등 지하구조물 또한 파손되어 단수, 누수 등의 피해를 초래하게 된다. 이와 같이 액상화 현상이 발생하게 되면 수 많은 인프라 시설물에 막대한 피해를 야기시키고 복구작업 또한 어렵다. 따라서 지진으로 인한 액상화 피해사례가 많은 미국, 일본에서는 모든 구조물의 내진설계 시 액상화에 대해 우선적으로 검토할 정도로 중대하게 다루고 있다[5]. 우리나라에서도 액상화 현상이 공식적으로 확인된 포항 지진 이후 액상화 위험지도 제작의 필요성이 커지고 있다. 액상화 분석을 위해서는 지반정보에 대한 데이터가 우선적으로 필요하다. 국토교통부는 전국토의 지반조사결과를 체계적으로 관리하고 재활용을 위하여 2003년부터 건설현장에서 발생하는 지반시추성과 관련된 각종 조사 및 관측자료와 시험자료를 데이터베이스로 구축한 국토지반정보 통합DB센터를 운영하고 있다[6,7]. 우리나라에서의 지진재해의 위험성이 높아지면서 지진발생 시 피해 예측지역에 대한 분석 및 복구를 위한 대응체계 구축에 대한 요구가 높아지고 있다. 액상화 피해 예측 위험분석은 지반정보와 지진파를 기반을 이루어지지만 액상화 가능성지수 (Liquefaction Potential Index) 및 액상화 심각성지수(Liquefaction Severity Number) 산출을 위한 복잡한 공학적인 처리과정이 요구된다. 또한, 지반정보의 활용요소 추출을 위하여 데이터의 신뢰성 검토과정이 필요하고, 액상화 위험분석의 경우에는 모든 지역에 대한 액상화 피해예측 위험분석은 비효율적으로 200m이상의 산악지역과 지하심도 20m 이상의 지하공간에서는 액상화가 발생하는 경우

가 거의 없기 때문에 액상화 분석 및 GIS 분석맵 구축 시 다양한 경계조건을 반영한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 액상화 분석을 위해 국토지반정보 통합DB센터에서 보유하고 있는 시추정보를 활용하고자 하며, 이를 위해 시추정보 DB 추출 모듈과 지진피해가 예상되는 피해 예측지역에 대한 지반정보와 발생 가능한 지진파를 입력값으로 하여 그 지역에 대한 액상화 피해 예측정보인 액상화 가능성지수 및 심각성지수를 산출하고, 산출된 3차원 측정 기반의 액상화 가능성지수 및 심각성지수를 기반으로 크리깅 지형보간기법을 활용하여 3차원 액상화 피해 예측 GIS 분석모형을 구축한 후 2차원 및 3차원의 액상화 피해 예측 GIS 분석맵 구축 모듈을 개발하고자 하였다. 즉 본 연구에서는 액상화 위험지도 제작을 위한 시추정보 DB 추출 기능을 구현하고 시추정보를 바탕으로 한 기초 데이터 모델링과 액상화 피해 예측 3차원 GIS분석 모듈 개발을 통하여 3차원 액상화 위험분석 GIS 분석맵 구현방안을 제시하였다. 이를 통해 국토지반정보 통합DB센터 보유 시추정보 추출의 효율화와 시추지역의 효과적인 저항치 가시화 기능을 제공할 수 있는 기반을 확보하고자 하였다. 즉, 개발된 모듈을 통해 얻어진 액상화 정보와 지반, 건물, 구조물 등 다양한 공간정보를 활용하여 액상화 대응을 위한 종합적인 의사결정을 지원할 수 있는 기술 개발이 가능할 수 있을 것이다. 또한, 3D GIS 기술기반 액상화 분석 및 가시화 기술을 활용하여 지진 재해대응, 지하안전관리 등 지원 체계 구축에도 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

1.2 관련 연구동향

국내에서는 액상화에 대한 연구와 관련하여 포항, 경주 지역을 중심으로 진행되고 있으나, 아직까지는 지도 형태로 정리된 결과는 찾아보기 어렵다. 국외에서는 일본에서의 사례를 많이 찾아볼 수 있는데, 특히 1995년 효고현 남부 지진을 비롯해 2011년 도호쿠 대지진 이후 사회적으로 요구가 높아진 것에 기인한다. 도쿄도 건설국에서는 2013년 3월에 도쿄지역의 액상화 예측도를 갱신하여 공개한 바 있다. 또한 일본에서는 일본 내각부 방재담당에게 제공받은 정보를 기초로하여 만든 전국액상화지도가 대표적인 사례이다. 이 지도는 지진 발생 시, 지역별 액상화 위험지도 뿐 아니라, 건물 파손 동수, 도로 통행 혼잡, 상수도 피해, 전력 피해 등의 예상도와 더불어 현재까지 발행하였던 진도 분포도를 함께 제공하고 있다. 특히, 액상화 위험 분포도의 경우 5단계(높음, 비교적 높음, 낮음, 매우 낮음, 액상화 대상 외)로 구분하여 시각적으로

알기 쉽게 표현하고 있다[8].

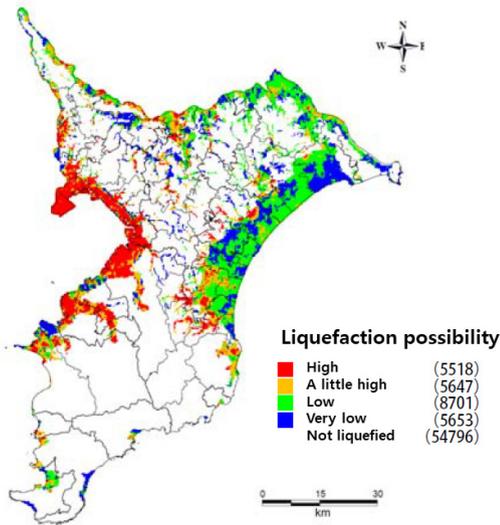


Fig. 1. Distribution map of liquefaction risk in Chiba[8]

한편 액상화와 관련한 GIS 분석에 대한 사례는 국내 뿐 아니라 국외에서도 찾아보기가 쉽지 않다. 유사한 사례로 일본 방재과학기술연구소의 3차원 진원지 분포에 대한 지도가 있다. 자바 스크립트를 활용하여 웹브라우저에서 볼 수 있게 되어 있으며, 2001년부터 2018년 12월 까지의 지진 정보에 대한 지진 진원에 대한 분포도를 볼 수 있다[9]. 아래 그림은 Hi-net의 관측에 의해 포착된 지진의 진원분포(규모 1.5 이상)를 3차원으로 표시한 예이다.

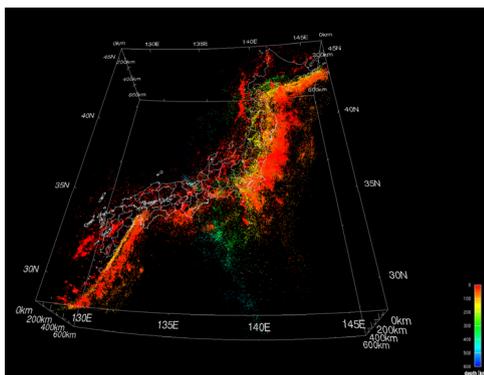


Fig. 2. 3-D Hypocenter Distribution[9]

2. 액상화 위험지도 작성 방법

본 연구에서는 액상화 위험지도의 가시화를 위해서 현재 서비스 되고 있는 국토교통부 국토지반정보시스템의 검색유통기능을 활용하였다. 국토지반정보 포털시스템은 현재 27만공이 넘는 시추공 데이터를 확보하고 있으며, 매년 약 2~3만공의 시추공 데이터가 업데이트 되고 있다. 전국의 시추공 중에서 액상화 주변의 시추정보를 선택하여 액상화 모델을 다운로드 및 전용 뷰어를 통한 가시화가 가능하도록 하였다. 즉, 시추공 데이터의 추출에서부터 액상화 평가, 지도 표출까지 일련의 과정을 자동화함으로써 매년 추가되는 시추공 데이터를 바탕으로 손쉽게 업데이트가 가능하게 된다.

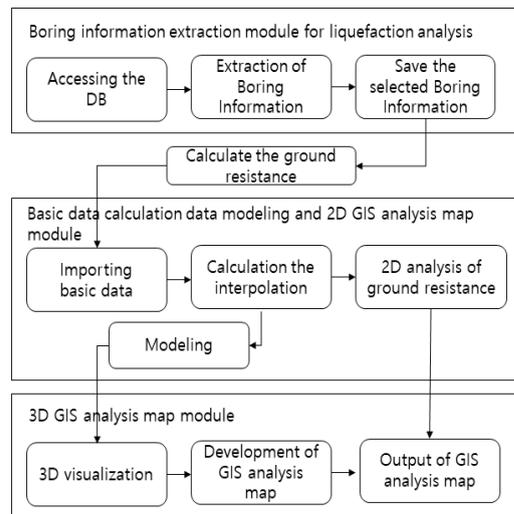


Fig. 3. Process of technical development

이와 같이 함으로써, 매년 액상화 위험지도의 신뢰성 또한 상승될 수 있을 것이다. 다음 그림은 본 연구에서 수행한 액상화 분석 시추정보 DB 추출 및 3차원 GIS 분석맵 구축 모듈의 전체적인 개념도를 나타낸 것이다.

3. 시추정보 DB 추출 및 기초데이터 모델링 구축 모듈 개발

3.1 시추정보 DB 접속 및 추출 기능

클라이언트 서버 기반인 국토지반정보 포털에서는 지하 안전관리 핵심 정보인 시추정보와 지반정보를 동시에

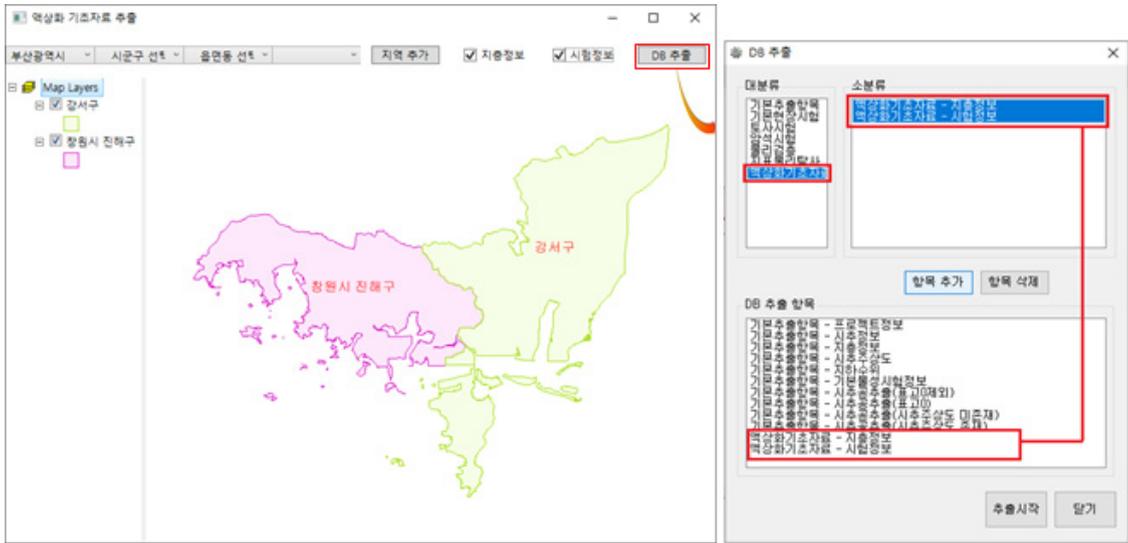


Fig. 4. Selected screens of local and boring information

제공하고 있다. 이와 함께 최근 도시 지역에서 빈번히 발생하고 있는 지반 함몰 및 침하 사고에 대응하기 위하여 도시 지역의 자료가 많은 민간 분야 시추정보 DB 구축을 위하여 건축행정 시스템에서 보유 중인 민간 분야의 지반조사보고서 수집을 완료한 상태이다. 이에 본 연구에서는 국토지반정보 포털서버 연동 모듈을 개발하여 구축된 시추 정보의 DB를 접속 할 수 있도록 하였다. 국토지반정보 포털 서버는 외부망과 단절되어 있으므로 연동 모듈은 포털 서버에 설치하여 사용할 수 있도록 개발하였다. 즉, 프로그램이 설치된 PC에 시추정보 DB가 있다면 자동 접속하여 읽기 기능이 가능하도록 구현하였다. 또한, 국토지반정보 포털 서버 연동 모듈을 통하여 접속된 DB로부터 사용자가 원하는 지역에 시추정보 항목의 시추정보만을 추출하여 로컬 영역에 저장하는 기능을 구현하였다. 이 정보는 저항치 계산에 필요한 기초 데이터 수집에 활용된다. 액상화 분석 시추정보 DB 추출의 진행과정은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서는 행정구역별 선택 리스트 박스로 원하는 지역을 선택하고 DB 추출 버튼을 실행하여 시추정보 항목을 선택한 화면을 나타내고 있다. 위 화면에서 DB 추출 창을 통해 추출이 가능한 시추정보 항목은 Table 1과 같다.

3.2 최적 지형보간법 기법 선정

액상화 분석 기초데이터로부터 일정 간격에 해당하는 저항치 값을 산출하기 위해서는 보간을 통해 계산해내야

Table 1. Items of extractable boring information

Major categories	Sub-categories
Extract items	Project information
	Boring information
	Geotechnical layer information
	Boring profiles
	Basic material test information
Basic field tests	Standard penetration test
	Joint interval
	Rock mass rating
	Lugeon test
	Field permeability
	Pressure meter
Soil tests	Cone penetrometer
	Mechanical analysis test
	California bearing ratio test
	Consolidation test
	Uniaxial compression test
	Triaxial compression test
	Resonant column test
Cyclic triaxial test	
Rock tests	Uniaxial compression test
	Triaxial compression test
	Point load test
	Rock joint and its application test
	Resonant column test
Geophysical logging	Cyclic triaxial test
	PS logging
	Down hole test
Geophysical survey	Density logging
	Electrical resistivity
	Seismic refraction survey

한다. 보다 정확하고 신뢰성 있는 결과값 도출을 위해 본 연구에서는 크리깅(Kriging) 외 방사기반함수(Radial basis function), 자연화소(Natural neighbor), 역거리가중법(Inverse distance weight), 불규칙 삼각망

(Triangulated irregular network), 스플라인(Spline) 등 6가지 보간기법 알고리즘을 제공하여 보간기법별 상호 비교를 통하여 보다 신뢰성 있는 보간 결과값을 도출할 수 있도록 지원하였다. 본 연구를 통하여 도출된 최적 지형보간법은 크리깅 보간법이며, 지형보간법별 정확도 비교분석은 시추정보의 균집도가 250m 이내의 균질한 분포지역을 선정하고, 시추공 보링 위치 및 지층조사를 통하여 획득한 지층정보를 참값으로 하여 매립토층, 붕적토층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층 등 지반의 표준지층에 대한 지형보간법별 정확도 비교분석을 수행하여 최적 지형보간기법을 도출하였다. 또한, 도출된 최적 지형보간기법인 크리깅 보간기법은 200m 이상의 산악지역 및 지하심도 20m 이하의 범위 제외 등의 경계조건 하에서 크리깅 지형보간방법의 정확성이 가장 높게 분석된 결과이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 크리깅 사용시, 파라미터 설정 리스트 박스에서 'Kriging'을 선택한 다음 'Nugger',

'Range', 'Sill'은 mode(Expon mode, Gauss mode, Spher mode)를 선택함에 따라 각각의 파라미터를 수정할 수 있다.

보간 간격(기본값 '5')을 입력하고 시작 버튼을 클릭하면 보간 진행창이 출력되면서 지반 저항치 DB를 선택한 보간법 알고리즘을 이용하여 보간하도록 하였다.

4. 3차원 GIS 분석맵 구축 모듈 개발

4.1 기초자료 가시화 기능 구현

surface 가시화 기능은 1m 간격으로 보정된 지반 저항치(R)를 가시화 하는 기능이다. 지반 저항치 surface를 가시화 하기 위해서 다음 Fig. 6과 같이 surface 가시화를 클릭하면 지반 저항치 surface 가시화가 된 화면이 출력될 수 있도록 기능을 구현하였다.

4.2 음영기복도 분석 기능 구현

음영기복도는 3차원의 형태를 가진 지형을 2차원의 평면 상에 자연스럽게 직관적인 방법으로 표현한 것으로, 높이값을 갖는 3차원의 데이터와 빛의 방향, 음영, 색조를 이용하여 지형을 알아보기 쉽도록 제작한 지도이다.

음영기복도 분석기능은 선택한 깊이의 지반 저항치에 대한 음영기복도를 분석하는 기능이다. 음영기복도 분석을 실행하여 분석한 화면은 다음Fig. 7과 같다.

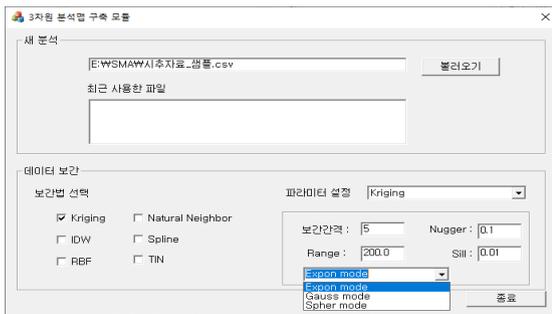


Fig. 5. Selected screen of Kriging interpolation

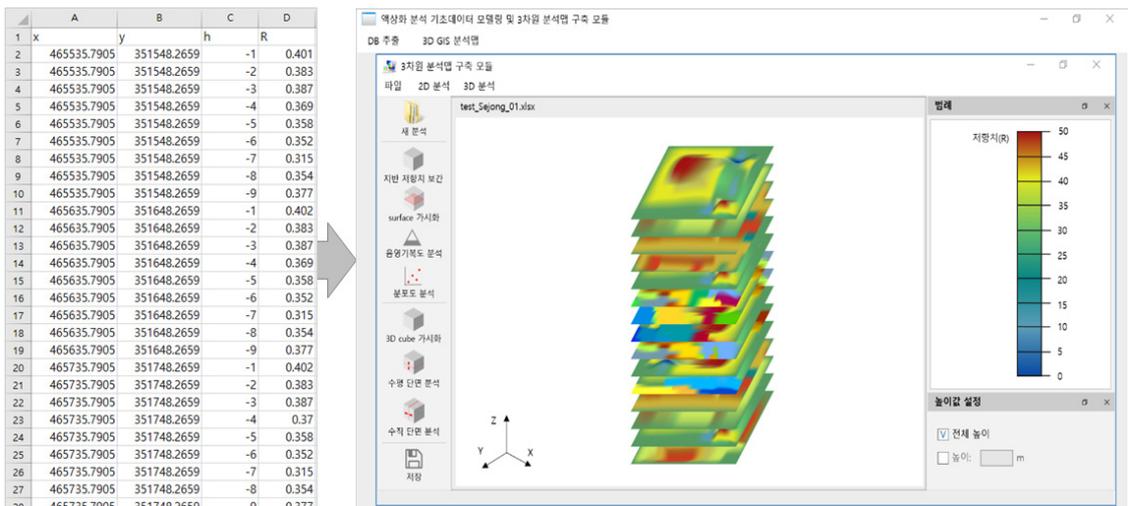


Fig. 6. Screen of soil resistance visualization

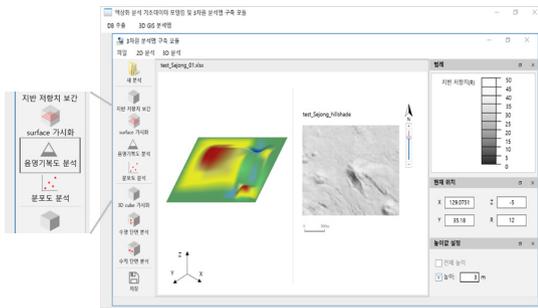


Fig. 7. Screen of shaded relief map analysis

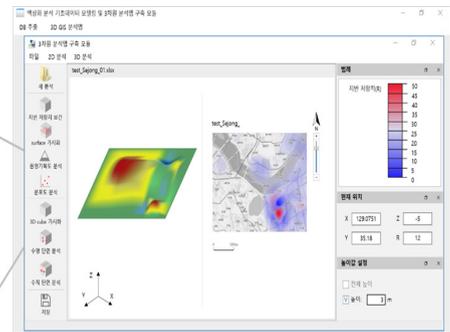


Fig. 8. Screen of distribution chart analysis

4.3 분포도 분석 기능 구현

분포도는 지표상에 분포하는 그대로의 형태를 나타내는 것과 인구분포도와 같이 현상을 수치화하여 통계지도의 형태로 표시하는 것으로 구분되는데, 본 연구에서의 분포도 분석은 선택한 깊이의 지반 저항치에 대한 분포도를 분석하는 기능으로 구현하였다. 분포도 분석을 실행하게 되면 선택한 깊이의 지반 저항치에 대한 분포도 분석 결과는 다음 Fig. 8과 같이 출력된다.

4.4 3D GIS 분석맵 구축 기능 구현

지반 저항치 2D 분석 결과를 바탕으로 3D 저항치 값에 대한 모델링을 하고 이를 입체적으로 화면에 도시하

는 기능이다. 도시된 화면은 확대, 축소, 회전 등이 가능하며, 각 저항치 값에 대한 범례를 지원하여 시각화에 도움을 주는 기능을 한다. 즉, 본 연구에서는 액상화 분석 기초데이터를 통해 가시화된 GIS 분석맵을 구축하는 것으로 각 해당 값을 DB로 구성하며 구성된 데이터를 분석하여 임의의 수평, 수직(중/횡단면) 단면을 선택하여 필요한 지역에 대한 해당 단면도 값을 분석하는 기능을 구현하였다. 다음 Fig. 9에서는 수평 단면 분석 팝업 메뉴와 아이콘 중 하나를 클릭하여 수평 단면 분석을 실행한 후, 3D 큐브에 그려진 점선을 위아래로 드래그하여 점선의 위치의 단면도가 화면에 출력하는 기능을 보여주는 화면이다.

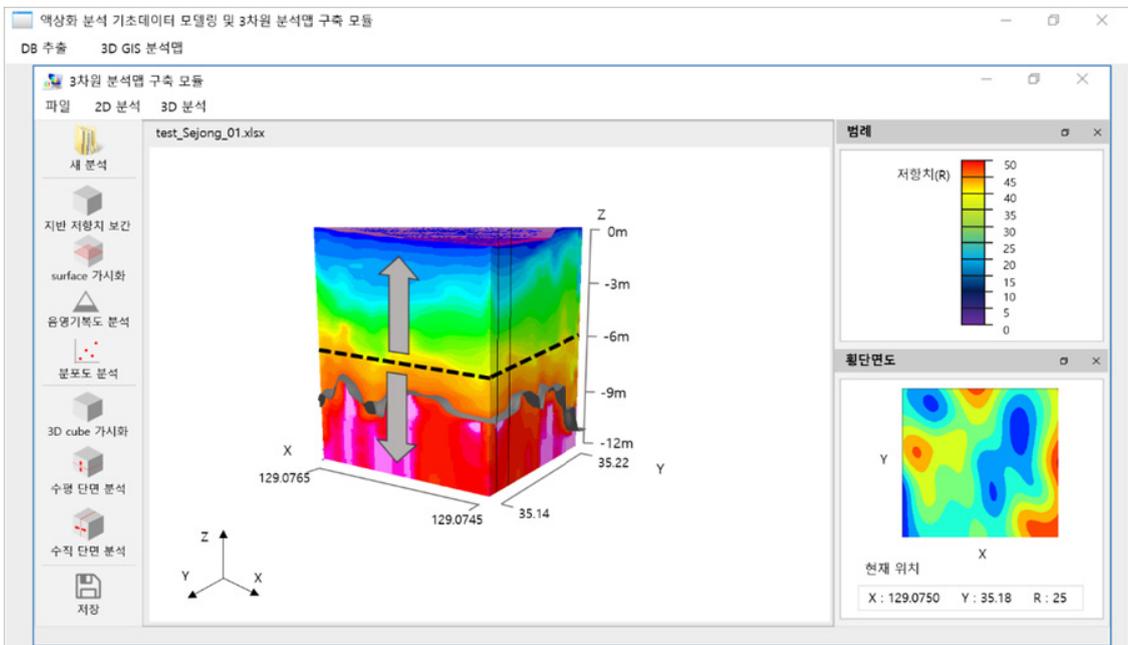


Fig. 9. Screen of horizontal cross section analysis

5. 결론

본 연구에서는 액상화 분석과 가시화를 위해 국토지반 정보 통합 DB에서 시추정보 DB 추출 기능을 구현하고 시추정보를 바탕으로 기초데이터 모델링과 3차원 기반의 액상화 피해 예측 GIS분석기능을 개발하여 액상화 위험 분석 GIS맵 구현 방안을 제시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다. 첫째, 국토교통부의 국토지반 정보 통합DB 실시간 정보 접근 및 추출이 가능한 시추정보 DB 추출 기능 개발이 가능하였고, 이를 통해 지속적으로 변화하는 최신의 시추정보 DB 활용 기반의 정밀 액상화 위험분석 기반을 마련할 수 있었다. 둘째, 불규칙한 곡면으로 이루어진 3차원 액상화 위험분석 모델을 생성하기 위하여 크리깅 보간법을 최적 지형보간기법을 도출하였다. 또한, 해발 200m이상 지하 20m이하 범위제외, 시추정보의 250m 균질 균집도 분포지역에 한정하여 분석한 최적 지형보간기법으로서 사용자가 경험 등 다양한 조건에서 지형보간기법들을 활용할 수 있도록 6개의 지형보간기법을 적용할 수 있도록 액상화 위험분석 3차원 GIS분석 모듈을 개발하였다. 셋째, 기존 2차원 기반의 액상화 위험지도를 3차원 기반의 지하지층별 액상화 위험분석 GIS분석기능을 구현하여 3차원 액상화 위험분석 GIS맵 생성할 수 있었다. 이를 통해 지표면 해석결과를 통한 유추해 온 기존의 지하의 액상화 위험판단 및 의사결정체계 방식의 한계성을 본 연구개발성과를 통하여 지하의 액상화 영향을 가시화하여, 의사결정자가 직접 시각적으로 확인할 수 있어 기존 의사결정체계에 정밀성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] S. H. Kim, "Mapping of Liquefaction Potential in Songdo Reclaimed Land", *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol.14, No.3, pp.298-304, Sep. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.15683/kosdi.2018.09.30.296>
- [2] S. S. Jeon, D. Y. Heo, S. S. Lee, "Earthquake-induced Liquefaction Areas and Safety Assessment of Facilities", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.7, pp.133-143, Jul. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.7.133>
- [3] B. S. Yoo, T. H. Bong, S. R. Kim, "Evaluation Methods of Cyclic Shear Stress Ratio for the Assessment of Liquefaction in Korea", *Journal of the Korean*

Geotechnical Society, Vol.35, No.6, pp.5-15, Jun. 2019.

DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2019.35.6.5>

- [4] S. S. Park, Z. Nong, S. G. Choi, H. D. Moon, "Liquefaction Resistance of Pohang Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.9, pp.5-17, Sep. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2018.34.9.5>
- [5] Y. J. Jin, K. J. Park, B. W. Song, "The Study for Ground Liquefaction Hazard Mapping with Simple Estimating Method", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.14, No.5, pp.199-204, Oct. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.5.199>
- [6] Ministry of Land Infrastructure and Transport. Geotechnical Information Portal System, <http://www.geoinfo.or.kr> (accessed Feb. 10, 2020)
- [7] J.T. Han, "Development of liquefaction damage prediction visualization system and liquefaction reinforcement method with high efficiency and low cost", Annual Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea, pp.15-127
- [8] Something Co.,Ltd. National Liquefaction Map, <http://www.s-thing.co.jp/ekijyoka/index.html> (accessed Feb. 10, 2020)
- [9] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 3-D Hypocenter Distribution, www.hinet.bosai.go.jp (accessed Feb. 10, 2020)

이 우 식(Woo-Sik Lee)

[중신회원]



- 1997년 2월 : 경상대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 경상대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2002년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

GIS, 건설IT융합, 건설안전

장 용 구(Yong-Gu Jang)

[정회원]



- 1993년 2월 : 부산대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 부산대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원
- 2018년 5월 ~ 현재 : 국토교통부 지하정보 활용지원센터 센터장

〈관심분야〉

3D 지하공간정보, 디지털 트윈