

# GIS를 이용한 서울 시범 지역에서의 부지고유 지진 응답의 정밀구역화

## Microzonation on Site-specific Seismic Response at a Model Area in Seoul Using GIS

선 창 국\* / 천 성 호\*\* / 장 의 룡\*\*\* / 정 충 기\*\*\*\*

Sun, Chang-Guk / Chun, Sung-Ho / Jang, Eui-Ryong / Chung, Choong-Ki

### Abstract

As computer technology has been rapidly advanced, geographic information system (GIS) is recently used in many disciplines. In this study, for a model area in Seoul, seismic hazard potential relating to site effects, which are influenced by the subsurface geotechnical conditions, was estimated using the GIS tool. The distribution of pre-existing borehole drilling data in Seoul metropolitan area was examined for the regional estimation of site-specific seismic responses at the model area. Spatial geo-layers across the entire model area were predicted by constructing a GIS-based geotechnical information system (GTIS). A microzonation of site period ( $T_G$ ) for estimating site-specific seismic responses at the model area was performed within the GTIS. The spatial microzoning map of  $T_G$  indicated seismic vulnerability of two- to four-storied buildings in the model area. Furthermore, a site classification map for determining the design ground motion was established based on the  $T_G$  within the GTIS. This informed that most of location in the model area was categorized into current site classes C and D. This seismic microzonation framework for the model area could be applicable particularly in the entire Seoul metropolitan area based on the pre-existing borehole data.

**key words** : site-specific seismic response, site effects, geographic information system, microzonation, geotechnical information

### 요 지

컴퓨터 기술이 급속히 발전됨에 따라, 최근에는 많은 분야에서 지리정보시스템(GIS)이 활용되고 있다. 이 연구에서는 서울 내의 한 시범 지역을 대상으로 지하 지반 조건에 따라 영향을 받는 부지 효과에 관련된 지진 피해 가능성을 GIS 기법을 이용하여 평가하였다. 시범 지역에서의 지역적 부지고유 지진 응답의 평가를 위하여 서울 대도시 지역에 대한 기존 시추 조사 자료의 분포를 파악하였다. GIS 토대의 지반 정보 시스템(GTIS)을 구축하여 시범 지역 전체에 대한 공간 지층 정보를 예측하였다. 서울 시범 지역의 부지고유 지진 응답 예측을 위한 부지 주기( $T_G$ )의 정밀구역화를 GTIS 내에서 수행하였다. 공간 분포 정밀구역화 지도로부터 시범 지역 내 2 층에서 4 층 건물들의 지진 취약성을 확인하였다. 또한, GTIS 내에서  $T_G$  분포를 토대로 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 분류 지도를 작성하였으며, 그로부터 대상 시범 지역 부지의 거의 대부분이

\* 정회원 · 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원 (E-mail : pungsun@kigam.re.kr)

\*\* 서울대학교 공학연구소 박사후연구원

\*\*\* 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

\*\*\*\* 서울대학교 건설환경공학부 교수

현행 지반 분류 C 와 D로 분류됨을 확인하였다. 이와 같은 서울 시범 지역에 대한 지진 정밀구역화 적용 구조 체계는 특별히 기존 시추 자료를 활용하여 대도시 서울 지역 전체에 대해 적용 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 부지고유 지진 응답, 부지 효과, 지리 정보 시스템, 정밀구역화, 지반 정보

## 1. 서 론

최근 미국, 일본, 대만, 인도네시아, 인도, 이란, 터키 등과 같은 강진 지역에서는 빈번하게 대규모 지진들이 발생해 왔고 그에 따른 직접 또는 간접적인 여러 형태의 피해들이 주요 재해 사례들로 보고되어 왔다. 이와 같은 지진과 그로 인한 피해가 인류 문명에 대한 주요 자연 재해로 새삼 인지되어 오고 있는 가운데, 2007년 1월 20일 한반도 내륙의 강원도 오대산에서 규모 4.9의 중규모 지진이 발생하였다(한국지질자원연구원, 2007). 오대산 지진이라고 명명된 이 지진은 내륙 발생 지진으로는 1978년 발생한 규모 5.0의 홍성 지진 이후 최대 규모 지진으로서, 1996년 발생한 규모 4.5의 영월 지진과 더불어 강원도에서 발생한 주요 지진으로 기록되었다. 오대산 지진으로 인한 진동은 거의 전국적으로 감지되었으며, 이로 인한 국민들의 불안감은 극에 달했던 것으로 알려지고 있다. 실제 진동을 감지한 사람들은 대부분 아파트나 상가와 같은 건물 내부에 위치해 있었고, 건물의 진동을 체험한 것으로 파악해 볼 수 있다.

건물과 같은 구조물에서 지진 시 겪게 되는 진동은 지반을 통해 전달된 지표면 부근의 지진동(地振動, ground motion)이 원인이며, 구조물의 형태, 크기 등에 따라 그리고 동일 구조물 내에서도 위치에 따라 그 진동의 크기나 양상은 달라질 수 있다. 지진동은 진앙으로부터 동일한 거리 일지라도 해당 부지 고유의 지진 응답 특성에 따라 진동의 크기나 지배적인 주파수 성분이 다르게 나타나게 되고(Sun 등, 2005), 부지 지진동의 특성이 구조물 고유의 진동 특성과 부합하거나 유사할 경우 구조물의 공진(resonance) 발생으로 인하여 다른 부지에 비해 구조물 진동이 커지거나 심한 경우 구조물에 심각한 손상을 초래할 수도 있다. 즉, 부지의 지질 조건과 이에 따른 지반의 동적 특성은 지진시 지표면에서의 지반 운동에 매우 큰 영향을 미치며, 이러한 영향은 기존 해외의 수많은 실제 사례와 연구를 통해 보고되어 왔다(Sun, 2004).

특히, 대도시와 같은 광범위한 지역에 대한 지반 특성의 합리적 예측은 일차원적인 지반 조사 자료의 산발적 이용만으로는 불가능하며, 지반 조사 자료의 종합적 활용을 통해서만 가능하다. 최근 사회 기반 시설 확충을 위한 국토 개발 과정 중에 수많은 지반 조사가

수행됨에 따라 주로 도시 지역을 중심으로 상당한 양의 지반 조사 자료가 축적되어 있다. 지역 내에 분포하는 지반 조사 자료를 이용한 지반 특성의 공간적 예측과 그를 통한 지진 방재 측면의 활용을 위해서는 복합 속성 형태의 자료를 체계적으로 관리할 수 있는 효율적인 운용 체계가 반드시 필요하다. 이러한 기능을 충족할 수 있는 기법으로서 최근 그 적용성이 더욱 고차원화 되고 있고, 전 세계적으로 다양한 학문 분야에서 광범위하게 도입하여 활용되고 있는 지리 정보 시스템(geographic information system, GIS)을 들 수 있다(Kunapo 등, 2005). 국내의 경우 기존 지반 조사 자료의 관리를 위한 데이터베이스(database, DB) 시스템은 체계화되고 있으나(건설교통부, 2002), 구축된 기존 지반 조사 자료 DB를 이용한 지진공학적 활용 사례는 매우 드문 실정이다. 최근, 조사된 지반 특성을 토대로 GIS 기반의 지진 재해 평가 연구가 일부 진행되어 왔다 할지라도(Sun, 2004), 이러한 연구는 지진공학적 관점의 지반 조사 계획 및 수행을 통해 이루어진 것이므로 기존 지반 조사 자료를 활용한 연구 사례로 보기 어렵다. 본 연구에서는 일반적인 지층 조사나 지반 특성 파악 목적으로 수행되어 온 기존의 시추 조사 자료 등을 적극 활용하여 광범위한 지역의 부지 효과(site effects)에 따른 지진 응답 특성을 GIS 기법을 토대로 예측하여 가시적 정보를 제공하고자 한다. 이를 위하여 오랫동안의 개발에 따라 기존 지반 조사 자료가 폭넓게 축적된 서울 지역 내에서 평야 지형을 보이는 시범 영역을 선정하고 대상 지역에 대한 GIS 기반의 정밀구역화(micro-zonation)를 통해 부지고유 지진 응답 특성의 지역적 예측을 수행함으로써, 기존 지반 조사 자료 토대의 효율적 지진 방재 시스템 구축 활용의 모범적 방안을 제시하고자 한다.

## 2. GIS 토대의 공간 지반 정보 시스템

대규모 복합 속성 자료인 지반 정보는 지표 및 지하 공간의 삼차원적 분포 특성을 보이며, 이의 효율적 관리와 이용을 위해 GIS 기법 토대의 지반공학적 시스템들이 근래에 개발되어 왔다. 특히, 도시 지역을 대상으로 지반 자료의 종합 관리와 더불어 지진 재해 대책 수립을 위한 기본 방안으로서 최근 해외에서는 광범위

하게 지반 정보 GIS가 개발 및 구축되고 있다(Sun, 2004). 지반 정보는 그 의미와 내용에 매우 다양한 정보를 포괄하며, 지반 특성과 그에 따른 재해 특성을 파악하기 위해 근본적으로 활용되는 가장 중요한 정보는 지층(geotechnical layers 또는 geo-layers) 정보이다. 즉, 지층 정보의 합리적 예측을 통해 지반 관련 재해의 개괄적인 파악이 가능하므로, 대상 지역 내 지반 특성 관련 정보의 공간적 분포를 신뢰성 높게 예측하기 위한 지구통계학적 크리깅(Geostatistical kriging) 기법을 적용하여 연구 대상 지역의 지층 정보를 보간하였다(천성호 등, 2005).

본 연구에서는 지역적 지반 특성의 합리적 예측을 통한 부지고유 지진 응답의 평가 목적으로, GIS 기법 토대의 지반 정보 시스템(geotechnical information system, GTIS)을 구축하였다. 구축한 지반 정보 시스템(GTIS)의 전체 구성은 그림 1과 같으며, 3 개의 일반 GIS 구성 요소와 1 개의 추가적인 지반 전문가적 요소로 이루어진다. 이 중 데이터베이스(Database) 요소 내에는 일반적인 시추 조사 자료와 지표면 상 분포 형태의 시설물, 그리고 지형 속성과 같은 자료도 포함되어 있다. 공간 분석(Spatial analysis) 요소에서는 지구통계학적 크리깅 기법을 적용하여 기지 자료를 토대로 대상 공간 영역 전체에 대한 지층 정보 예측을 수행하였다. 특히, 크리깅 예측에서는 지층 발달(landform) 특성을 고려해 구성 지층별로 최적의 베리오그램(variogram) 모델을 차별적으로 적용하였으며, 각 지층의 경계면 고도 자료 대신 예측 불확실성을 줄일 수 있는 두께 자료를 대상으로 보간 예측하였다(천성호 등, 2005). 또한, 이 요소 내에서는 다른 구성 요소들에서의 추가 활용이나 외부 자료 제공을 위한 보간 자료 추출(data extraction)도 가능하다. 가시화(Visualization) 요소는 GIS 기법의 가장 두드러진 기능으로서, 정보 기술의 발달에 따라 이차원이나 삼차원뿐만 아니라 시간에 따른 사차원 가시화도 가능하다. 가시화 대상은 보간 예측되거나 추가 연산된 정보뿐만 아니라 기지의 초기 자료들도 포함되며, 데이터베이스 요소로부터 제공받게 된다. 이와 같은 3 가지의 일반 GIS 요소들과 더불어 부지고유 지진 응답을 예측하기 위해 본 연구에서 추가 구성한 지반 분석(Geotechnical analysis) 요소 내에서는 지반 조사 자료를 토대로 표준화된 기준에 따라 지층을 구분하고, 이를 통하여 지층 두께 연산 및 그를 통한 기반암 심도 연산을 수행하며, 연산된 지층별 두께를 토대로 지반 동적 특성인 전단파속도(shear wave velocity,  $V_s$ )를 추가 이용하여 부지 특성 주기(site

characteristic period 또는 site period,  $T_c$ )를 산정한다.

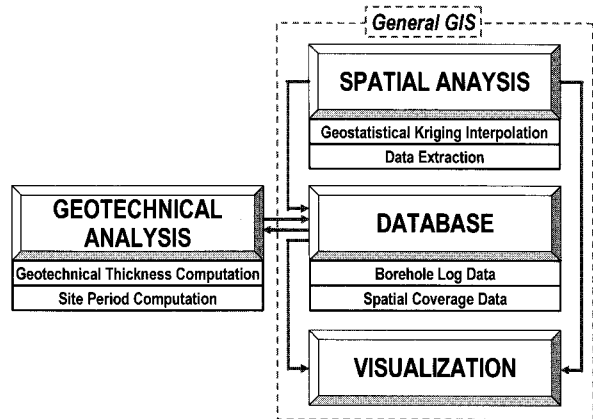


그림 1. 지반 정보 시스템의 구성

지반 정보 시스템의 전체 구성상의 복합적 기능을 달성하기 위해서는 여러 전문가적 GIS 소프트웨어의 상호 보완적 활용과 더불어 GIS와 연계된 전문가적 분석 기법의 병용이 요구된다(Gangopadhyay 등, 1999). 본 연구에서는 GTIS의 구축을 위하여 전문가적 GIS 소프트웨어로서 미국 CTech 개발사의 EVS(CTech, 2006)와 미국 Autodesk 사의 AutoCAD(Autodesk, 2006)를 이용하였으며, 그 외에도 초기 DB 구성을 위한 범용 편집 프로그램을 활용하거나 공간 정보 분석 및 연산을 위한 FORTRAN 코드 기반의 프로그램을 개발하여 이용하였다.

GIS 기법 토대의 지반 정보 시스템 구축을 통해 본 연구에서 궁극적으로 수행하고자 하는 가시적 결과는 특정 지역을 대상으로 지진공학적 대표 지반 변수에 대한 정밀구역화이다. 지반지진공학 측면의 구역화(zonation)는 가시적으로 표출되는 정보인 지도(map)의 작성에 이용된 자료의 성격 그리고 제시되는 지도의 축척에 따라 크게 3 단계 수준으로 구분된다(ISSMGE, 1999). 지진공학적 활용 목적으로 권역에 따라 구분하여 구축한 총체적 정보를 지진 구역화(seismic zonation)라고 하며 이런 개념으로 작성될 수 있는 것이 지진 구역 지도(seismic zoning map)이다. 표 1은 지진 구역화에 관한 3 단계 구분을 정리하여 제시한 것으로서, 대상 영역 면적이 작아 질수는 있으나 실제 의사 결정을 위한 정보 유용성 측면에서 정밀구역화가 일반 구역화(general zonation)나 거시 구역화(macrozonation)에 비해 가장 신뢰성 높은 정보를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 추가적인 응답 해석을 통한 정량적 예측 없이 신뢰성이 높은 현장 지

표 1. 구역화 3 단계 수준의 구분 및 활용 자료(ISSMGE, 1999)

구역화 수준 지진 현상	Grade-1	Grade-1	Grade-1
	General Zonation	Detailed Zonation (Macrozonation)	Rigorous Zonation (Microzonation)
지반 운동	<ul style="list-style-type: none"> <li>역사 지진 및 기존 정보</li> <li>지표 지질도</li> <li>지역 주민 탐문 자료</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>상시미동(microtremor) 자료</li> <li>개략적 지반 자료</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>지반 조사 자료</li> <li>지반 응답 해석</li> </ul>
사면 붕괴	<ul style="list-style-type: none"> <li>역사 지진 및 기존 정보</li> <li>지표 지질 및 지형도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>항공 사진 및 위성 영상</li> <li>현장 자료</li> <li>식생 및 강우 자료</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>지반 조사 자료</li> <li>사면 해석</li> </ul>
액상화	<ul style="list-style-type: none"> <li>역사 지진 및 기존 정보</li> <li>지표 지질 및 지형도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>항공 사진 및 위성 영상</li> <li>현장 자료</li> <li>지역 주민 탐문 자료</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>지반 조사 자료</li> <li>액상화 해석</li> </ul>
지도 축척	1:1,000,000 ~ 1:50,000	1:100,000 ~ 1:10,000	1:25,000 ~ 1:5,000

반 조사 자료를 토대로 부지고유 지진 응답 변수인 부지 주기( $T_0$ )에 관한 대축척의 삼차원 지도를 작성·제시함으로써 대상 지역 전체의 지반 운동에 관한 정밀 구역화를 수행하고자 하였다.

본 연구의 정밀구역화는 적용 자료의 종류나 결과의 축척에 따라 일반 구역화 및 거시구역화와 구분될 수 있으나, 컴퓨터 성능의 발전에 따라서는 정밀구역화 영역들의 확대 또는 병합을 통해 거시구역화나 일반 구역화의 특정 영역 요소로 활용될 수 있다. 즉, 기존의 연구 결과들에서는 제한적인 형태의 출력 자료로서 정보를 제공함에 따라 그 가시적 성과의 수준을 구분해 왔으나, 최근 GIS와 같은 정보 시스템 기법 내에서의 정보 확인의 경우 정보 지향적 출력이 가능하므로 실제 축척의 구분이 의미를 상실해 가고 있다. 정보 지향적 출력에서는 DB 자료의 종류나 개수 그리고 신뢰도에 따라 표출 대상의 수준이 결정되며, 정밀 구역화를 대상으로 구축된 정보는 거시구역화나 일반 구역화를 포괄할 수 있지만 일반 구역화 대상 구축 정보는 거시구역화나 정밀구역화를 포괄할 수는 없다. 따라서 본 연구의 정밀구역화 정보는 향후 대상 영역의 확대나 용도 전환 시 거시구역화나 일반 구역화의 정보로서도 활용 가능하다.

정밀구역화와 같은 지반 및 지진 정보는 그 자체로서 뿐만 아니라 지진 대응 방안으로서의 종합적 활용성을 내재하게 되며, 이러한 목적의 궁극적 달성을 위하여 최근 대표적으로 개발되어 활용되는 GIS 기반의 시스템이 미국 연방 재난 관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA)에서 개발한 HAZUS이다(NIBS, 2002). 본 연구와 같은 정밀구역화 정보를 이용한 HAZUS 활용 고찰로서, 그림 2에는 스위

스 Basel 지역의 지진 피해 예측 사례를 개념적 흐름으로 제시하였다(Fah 등, 2001). 그림 2는 궁극적으로 지진에 따른 권역별 건물 손상도를 평가하였으며, 두 가지 흐름 과정을 제시하고 있으나 각 과정 중에는 지반 특성에 따른 지진 운동의 정밀구역화 단계를 수반하고 있다. 즉, 개념적으로 살펴보면 지반 지진 운동의 정밀구역화 정보와 건물(또는 대상 시설물) 손상도 평가를 위한 권역 정보의 중첩을 통해 지진 피해 예측이 수행된다. 따라서 기저 정보인 정밀구역화의 신뢰도가 최종적인 지진 피해 예측의 신뢰도에 지배적인 영향 요인임을 확인할 수 있다.

### 3. 지반 정보 시스템 구축 대상 지역 선정

구역화를 통한 지역적 부지고유 지진 응답 특성의 예측 평가는 대상 영역 전체에 걸친 공간 지반 정보 예측이 선행되어야 가능하다. 공간 지반 정보는 GIS 기법을 이용한 GTIS를 구축함으로써 신뢰성 높게 예측할 수 있다. 본 연구에서는 국내의 대표적 대도시인 서울 지역을 지진공학 및 방재공학 측면의 예시적 모범 적용 대상으로 선정하였다. 특히, 서울 지역은 우리나라 경제 산업의 중심지이자 주거 밀집 지역으로서 지진 발생시 피해가 크게 발생할 수 있을 뿐만 아니라 오랫동안의 개발 이력에 따라 기존 지반 조사 자료가 다른 지역에 비해 상대적으로 많이 분포한다(서울대학교, 2002). 본 연구진은 이미 위탁 과업으로 서울시로부터 출력 형태의 지반 조사 보고서 자료들을 제공받아 서울 지역 기존 시추 조사 자료 DB를 구축하였으며(서울대학교, 2002), 기구축한 DB를 기반 자료로 하여 본 연구에서는 공간 지반 정보 시스템으

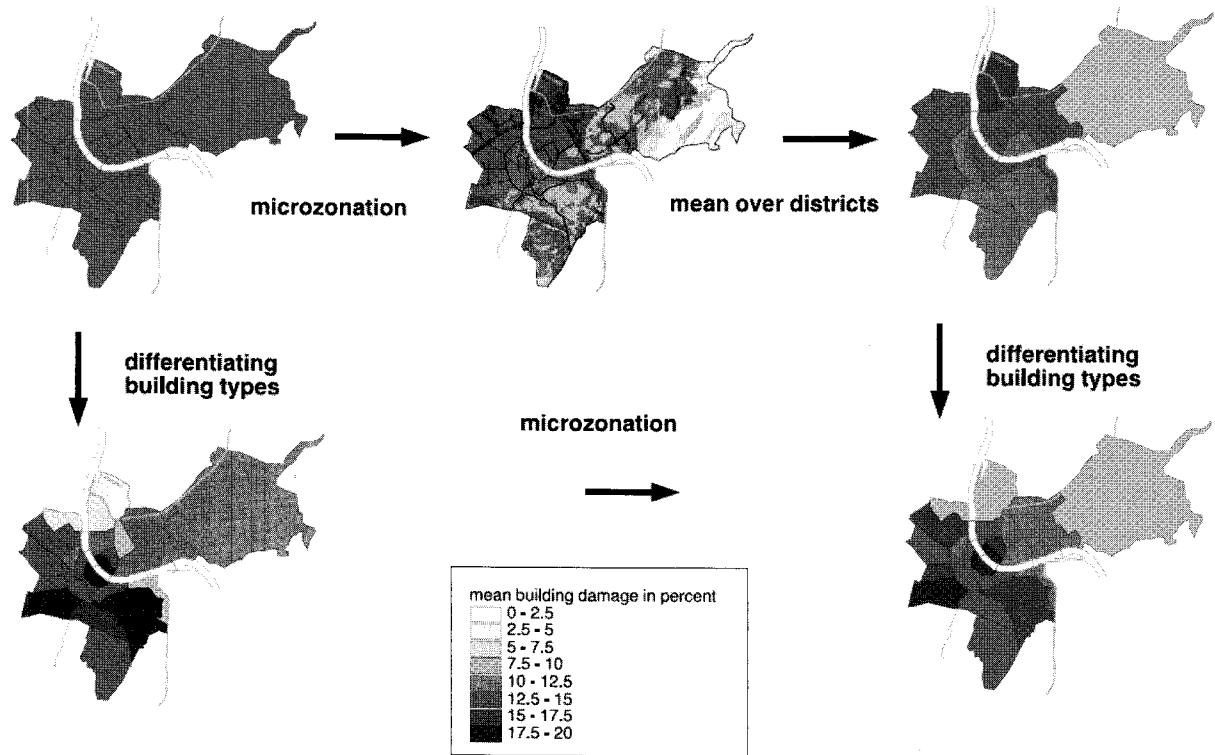


그림 2. 스위스 Basel 지역 HAZUS 지진 피해 예측에서의 정밀구역화 활용(Fah 등, 2002)

로 재구성하였다.

본 연구는 서울 전체 지역의 공간 지반 정보 시스템 구축 및 지진 방재 활용을 위한 사전 예비 연구로서, 기존의 일반적인 이차원적 자료 분포 현황 시스템과는 차별화되는 서울 내의 시범 지역에 대한 공간 지반 정보 시스템 구축을 통해 부지고유 지진 응답을 시범 지역 전체에 걸쳐 일괄적으로 예측하기 위하여 수행되었다. 이러한 지향적 연구 목적 달성을 위하여, 본 연구에서는 먼저 서울 전체 지역에 대한 기존 지반 조사 자료의 위치 정보 시스템을 삼차원으로 구축하였으며, 이를 토대로 서울의 지형 변화에 따른 기존 지반 조사 자료의 위치 분포 현황을 파악하여 공간 지반 정보 시스템의 구축 대상 시범 지역을 선정하였다. 시범 지역 선정을 위해 우선 기구축된 기존 지반 조사 자료 DB에서 지표면 조사 위치에 관한 공간 좌표를 추출하여 새로운 지표면 위치 DB를 재구축하고 그 분포 위치를 가시화함으로써 위치 정보 시스템으로 제시하였다. 그림 3은 서울 지역에 대한 기존 지반 조사 자료의 분포 현황 파악을 위해 구축한 위치 정보 시스템으로의 가시화 사례이다. 본 연구에서 위치 정보로 구축하여 파악한 서울 및 주변 지역의 기존 지반 조사 자료는 총 10,751 개이다. 이와 같은 다수의 지반 조사 자료는 주로 지하철, 건축물, 주요 구조물 등의 설

계나 시공 시의 자료로서, 지반지진공학 및 방재공학 적 측면에서 매우 유용한 기초 정보로 활용 가능하다. 그림 3은 서울의 지형적 특성에 따른 자료 위치의 직관적 파악을 위해 수치 지형도의 고도 정보를 토대로 TIN(Triangular Irregular Network)을 생성하고 그 위에 위성 영상과 자료 위치를 중첩하여 도시한 것이다. 이로부터 서울의 지형 변화에 따른 기존 지반 조사 자료의 분포 현황을 용이하게 파악할 수 있다. 서울 전체 지역에 대한 기존 지반 조사 자료의 DB 구축 및 자료 분포 정보 가시화로 대표되는 위치 정보 시스템은 서울 지역 전체 또는 일부 지역에 대한 지반지진공학 및 방재공학 측면의 응용 시스템 구축을 위한 자료 추가 확보 또는 추가 조사에 관한 의사 결정의 근본적 매개 정보로 활용될 수 있다.

부지 효과에 따른 지진 응답 특성은 국부적 지반 지질 조건 뿐만 아니라 지하 및 지표 지형 변화에 따라 서도 큰 영향을 받을 수 있다(Sun 등, 2006). 이러한 지하와 지표 지형의 공간적 변화로 인한 분지 효과(basin effect)와 지형 효과(topographic effect)는 체계적 지진 관측이나 해석적 연구를 통해 예측 평가 되어 왔으며, 본 연구와 같은 기존 지반 조사 자료만을 이용하는 지역적 부지 효과의 예비적 수준의 평가에서는 실제 정량적으로는 예측하기 어렵다. 또한, 광

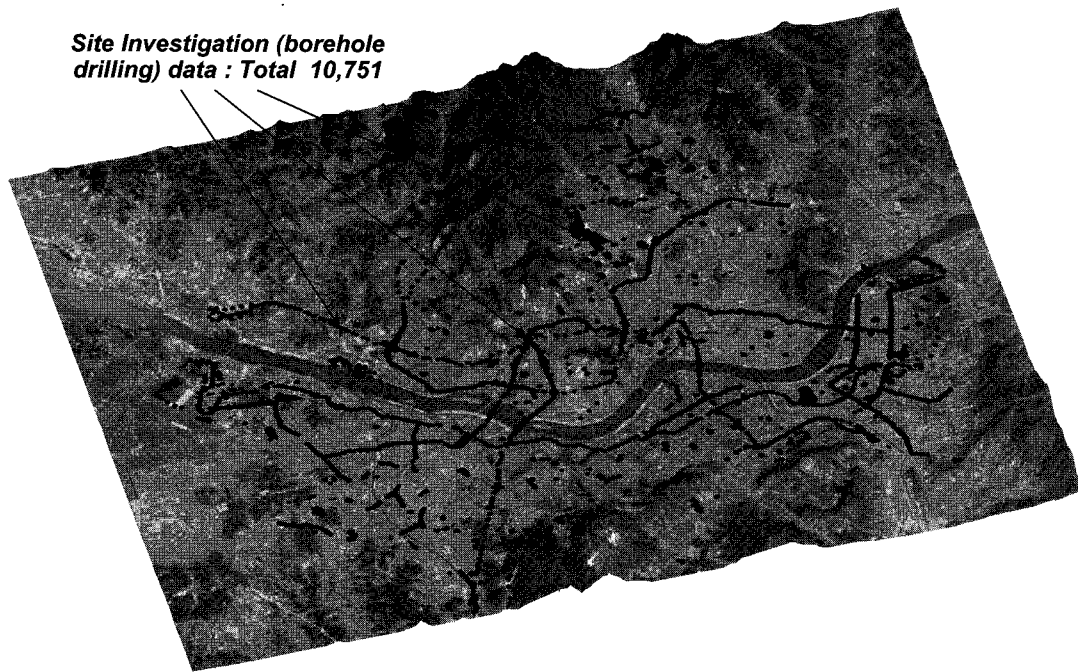


그림 3. 서울 전체 지역의 기존 지반 조사 자료에 대한 위치 정보

범위한 지역의 경우 분지 형상이나 지표 지형의 연직 변화가 수평 영역에 비해 상대적으로 작으므로, 이러한 다차원 효과가 매우 미미할 수 있다(Sun 등, 2006). 그렇다 할지라도 본 연구에서는 서울 전체에 비해 매우 작은 시범 대상 지역을 선정함에 있어서, 지하 및 지표 지형 변화에 따른 부지 효과에 있어서의 영향을 최소화하고 지진 응답 특성을 예측하기 위해 산지나 구릉지 대신 지형 변화 지수가 3,450인 평야 지역(천성호 등, 2005)을 선정하였다. 뿐만 아니라 대상 시범 지역은 기존 시추 조사 자료를 이용한 지진 응답 해석이 매우 다양한 부지들에서 수행된 지역이며(선창국 등, 2005), 향후 보다 종합적인 지진 재해 관련 기반 연구를 염두에 두고 선정되었다. 그림 5에는 서울 지역 내의 시범 지역 선정을 도시적으로 표현하였으며, 지반 조사 자료 위치 정보를 서울 지역 구경계 및 수계 정보와 함께 가시화하여 상대적인 자료 분포 현황을 쉽게 파악 가능하도록 제시하였다. 본 연구의 지역적 지진 응답 예측 대상인 시범 지역(4 km × 4 km Model Area)을 서울 남서부에서 확인할 수 있다. 그림 4의 좌측 삽입 그림에는 선정된 시범 지역의 세부적인 지반 조사 위치를 수계, 도로, 건물 및 등고선과 같은 지표상 배치 레이어(layer)들과 함께 중첩 도시하여 상대적인 위치 파악 및 지형적 요인과의 관계 파악이 용이하도록 가시적 정보로 도시하였다. 서울의 시범 지역은 TM(Transverse Mercator) 평면 좌표 체계(중부 원점 기준)상에서 동서 방향으로

는 186,500 m부터 190,500 m, 그리고 남북 방향으로 444,000 m부터 448,000 m까지 분포하도록 설정하였다.

#### 4. 서울 시범 지역에 대한 공간 지반 정보 시스템 구축

서울 지역 내 남서부에 위치한 4 km × 4 km 면적의 시범 지역을 대상으로 GIS 기법을 이용한 GTIS를 구축하기 위하여 대상 지역 내에 분포하는 총 307 개의 기존 지반 조사 자료에 대한 기존 DB의 지층 구성을 지진공학적 활용 목적을 고려하여 단순화 분류하고 DB를 재구축하였다. 지층의 단순화 구분을 통한 DB 재구축 과정에서는 그림 5에 개념적으로 제시한 바와 같이, 기존 DB의 지층을 매립토(fill), 퇴적토(alluvial soil), 풍화잔류토(weathered residual soil), 풍화암(weathered rock) 그리고 기반암(bed rock)의 5 종류로 종합하여 구분하였다(선창국 등, 2006).

시범 지역 대상의 GTIS에서는 지층의 3차원 정보를 전체 영역에 대해 지구통계학적 크리깅 기법을 적용한 보간을 통하여 확장 예측하였다. 그림 6은 시범 평야 지역 전체에 걸쳐 보간 예측된 지층의 공간 가시화 정보로서, 그림 6(a)에는 대상 지역에 대한 여러 지표상 배치 레이어들도 중첩 제시되었으며, 가시성 확보를 위해 연직 방향으로 3배 과장하여 표현하였다.

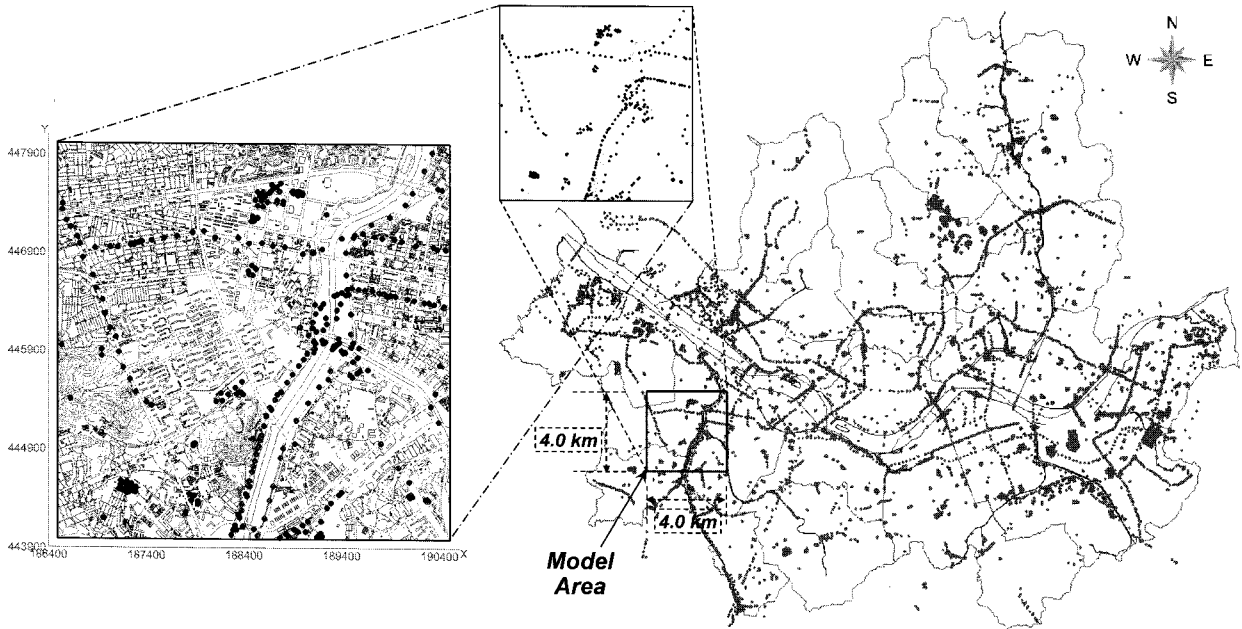


그림 4. 서울의 지반 조사 자료 위치 현황을 고려한 시범 지역(4 km × 4 km) 선정

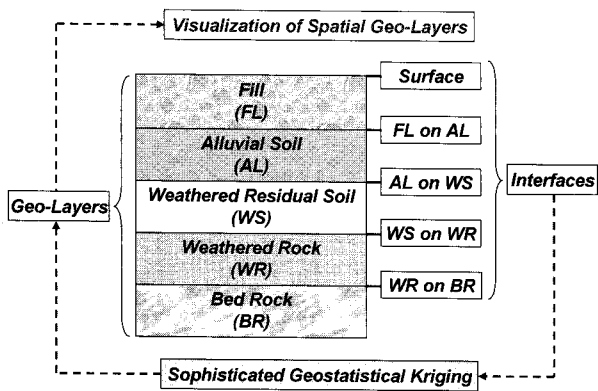


그림 5. 지층 구성 및 지층 보간을 통한 정보 가시화 흐름(선창국 등, 2006)

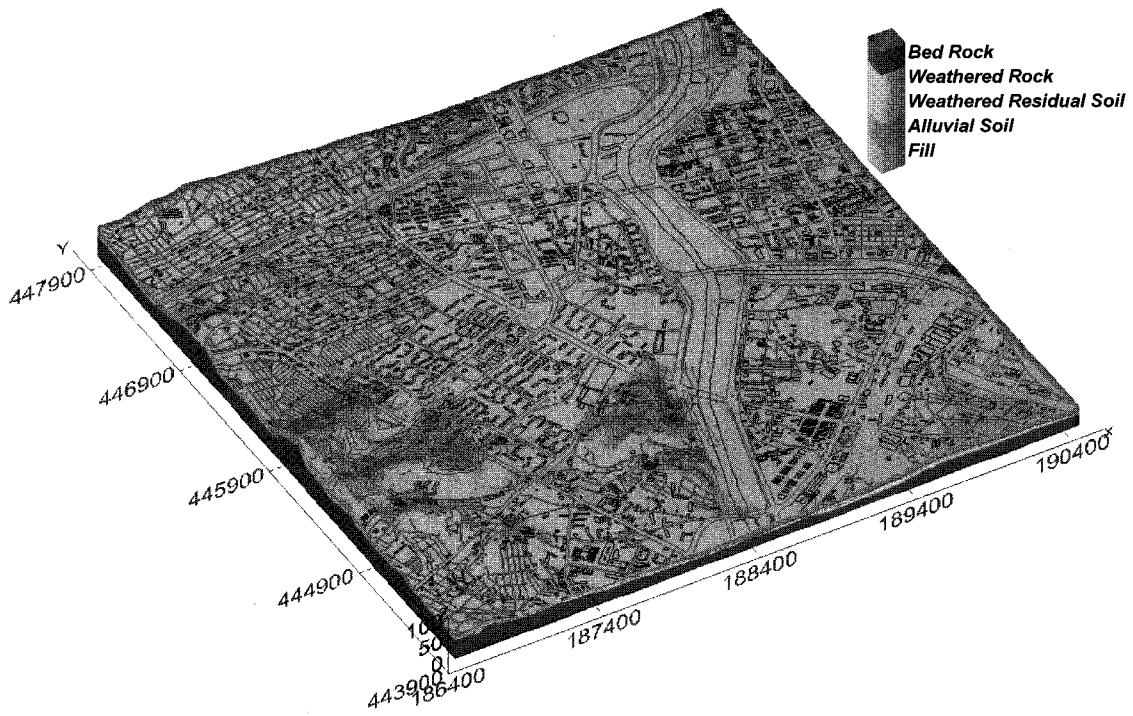
그림 6(b)는 임의 단면에서의 공간 지층 분포 정보의 확인 및 활용을 위해 GIS 기법 내에서 예시적으로 제시한 시범 지역에서의 지층 정보이다. 그림 6(b)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 대상 지역이 대체로 평야 지형을 보인다 할지라도 서쪽(그림의 좌측)의 구릉에 비해 동쪽(그림의 우측)의 하천 부근에서 토사 지층이 상대적으로 두껍게 분포하는 양상을 보인다. 이와 같은 토사 지층 두께의 공간적 변화는 부지고유 지진 응답 특성의 변화를 이끄는 매우 중요한 영향 요인이 된다(Sun 등, 2005).

GTIS의 대표적 결과인 삼차원 지층 정보는 GIS 기법 내에서는 가시적 현실성이 뛰어날 수 있으나, 전문가적 GIS 기법과는 거리가 먼 일반적인 실무 환경에서는 접근성이 결여될 수 있다. 이러한 실무적

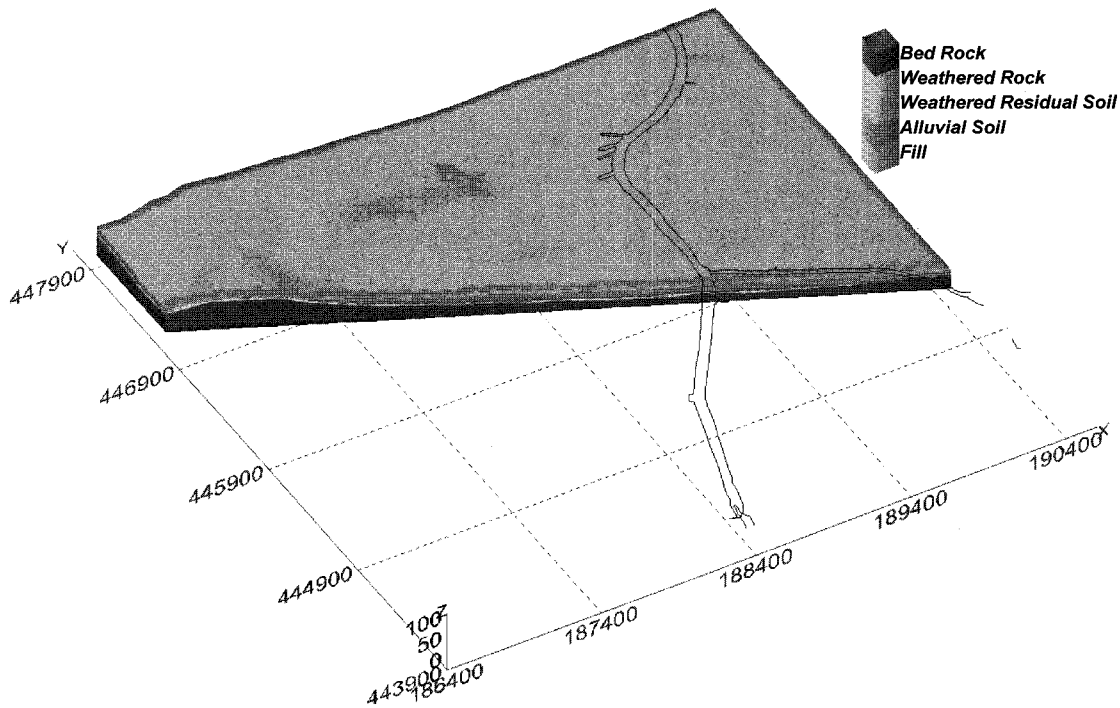
유용성을 확보하기 위해 여러 지층 정보를, 고전적 개념의 평면 등고 윤곽(contour)과 삼차원 지형 변화 정보를 결합하여, 지표면 투영 지층 정보로 GIS 기법 토대의 GTIS 내에서 재가공 할 수 있다. 그림 7은 시범 지역에 대한 지표면 투영 지층 정보의 대표적 사례로서, 기반암 상부 지층들의 두께 정보를 합산하여 도출한 기반암 심도 분포 정보를 제시한 것이다. 이러한 지표면 투영 정보는 구역화의 형태로 구축된 실무적 활용 목적의 지도라고 할 수 있으며, 지표상 배치의 수계와 건물 레이어들도 가시적 확인을 위해 중첩 제시하였다. 본 연구의 구역화는 서울 시범 지역 내에 분포하는 적용 자료나 대상 축척을 고려해 볼 때, 일반 구역화 및 거시구역화에 비해 정밀도가 높고 축척이 큰 정밀구역화에 해당된다(ISSMGE, 1999). 기반암 심도 분포 정보의 경우 일반적 견지의 지반공학 문제 해결을 위한 활용 뿐만 아니라 토사 두께 분포에 따른 부지 효과의 위치적 변화 예측과 같은 지진공학적 유용성도 제공할 수 있다. 이러한 지층 분포의 지진공학적 활용은 비록 접근 개념이나 정밀도가 본 연구와 다르긴 하지만 기존 지반 조사 자료를 토대로 토사 층적층 두께를 충청남도 지역에 대해 예측하여 HAZUS 토대의 지진 피해 평가를 수행한 국내 사례에서도 살펴볼 수 있다(한국지질자원연구원, 2002). 그림 7에서 확인할 수 있는 바와 같이, 비록 도시 개발이 완료된 현재 상태에서는 평야 지형을 보이는 대상 시범 지역 일지라도, 서쪽의 구릉지에서는 기반암 심도가 얇고 동쪽의 하천 평지

에서는 하천 작용으로 인한 퇴적토 발달에 따라 두꺼운 토사층(최대 약 40 m 두께) 분포를 보였다. 이와 같은 지표면 투영 형태의 구역화 정보는 대상 지역

내 모든 부지의 지반 특성 파악을 용이케 하므로 다양한 지역적 의사 결정 분야에 활용될 수 있다.



(a) 전체 지층 및 지표 배치 레이어들



(b) 지층의 공간 분포 확인 단면

그림 6. 서울 시범 지역의 GTIS 구축을 통한 공간 지층 정보



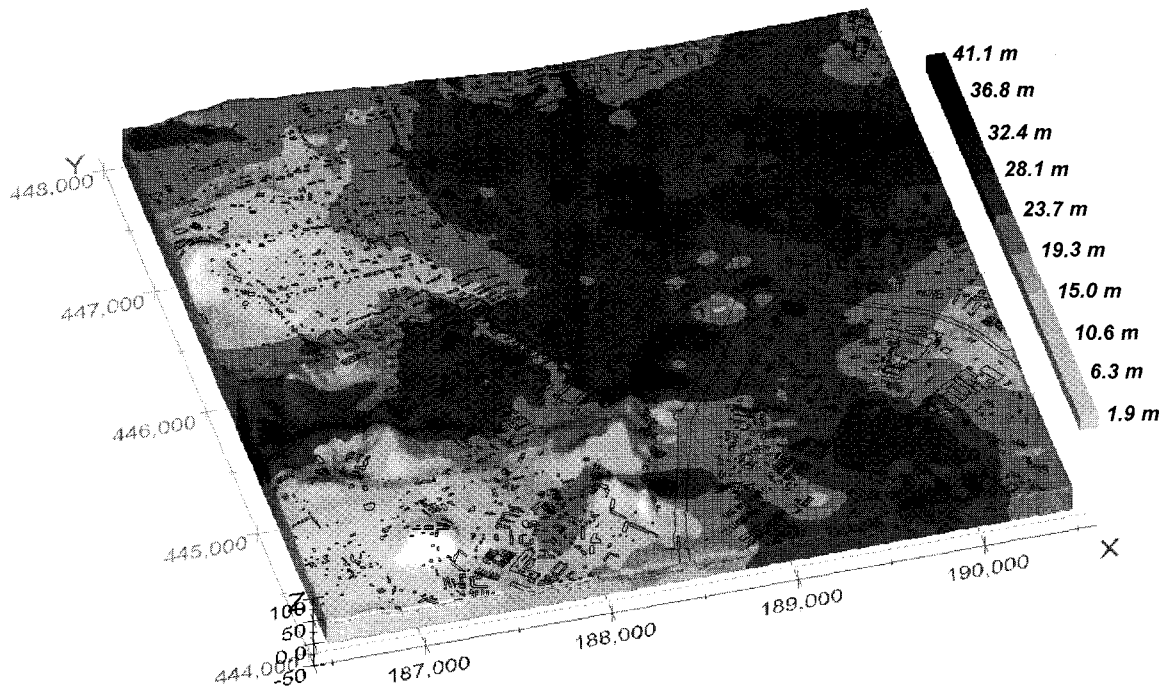


그림 7. 서울 시범 지역의 기반암 심도 분포 정보

## 5. 서울 시범 지역의 부지고유 지진 응답에 대한 정밀구역화

구조물에 지진 하중으로 작용하는 지표면 부근의 지진동의 크기나 주파수 특성은 부지별 고유의 지진 응답 특성인 부지 효과에 따라 달라지며, 일반적으로 부지 주기로 대표된다(Sun, 2004). 특히, 부지고유 지진 응답 특성이 반영된 지반 운동은 구조물의 고유 주기 특성에 따라 공진 현상을 발생시킬 수 있다(Kim 등, 2002). 또한, 최근에는 현행 내진 설계 기준의 부지 효과에 따른 지반 운동 결정의 합리적 개선의 일환으로 기반암 상부 토사층의 두께와 그의 동적 특성을 모두 고려한 부지 주기를 국부적 부지 효과의 정량적 분류 기준으로 제시하기도 한다(Rodriguez-Marek 등, 2000; Sun, 2004; 윤종구, 2006). 따라서 부지 주기를 이용한 부지고유 지진 응답 예측 기법은 부지 응답 해석과 같은 수치적 기법 없이 구조물의 지진 취약도 예측과 더불어 부지별 설계 지반 운동 결정을 통한 내진 설계에도 활용 가능할 것이다.

부지고유 지진 응답 지표인 부지 주기는 지진과 같은 진동 시 특정한 두 지점(기반암 상부와 지표면) 간 주파수에 따른 응답 변위의 비로 표현되는 전달 함수(transfer function)가 최대값을 보이는 기본 공진 주파수(fundamental resonance frequency,  $\omega_0 = 0.5\pi V_s/H$ )로부터 결정할 수 있는데,  $\omega_0$  의 역

수를 이용해 기반암 상부 단일 토사 지층 부지에서 토사 지층의 강성인 전단파속도(VS)와 두께(H)를 변수로 하는 부지 주기( $T_G = 4H/V_s$ )를 산정할 수 있다. 그러나 대개 현장 지반은 강성이 다른 여러 토사 지층들로 구성되어 있으므로 부지 주기는 일반적인 원위치 부지들에 대해서 식 (1)에 따라 결정될 수 있으며, 본 연구에서도 식 (1)에 따라 서울 시범 평야 지역 부지에서의 부지 주기를 산정하였다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{Si}} \quad (1)$$

여기서,  $D_i$ 와  $V_{Si}$ 는 각각 기반암 심도(H)까지의  $i$ 번째 지층의 두께( $H = \sum D_i$ )와 평균 전단파속도

서울 시범 지역에 대한 부지고유 지진 응답 특성 예측은 부지 주기를 공간 변수로 하여 GIS 기법을 이용한 정밀구역화를 통해 이루어 졌다. 지표면 투영을 위한 부지 주기의 산정에는 기반암 상부의 4 개 지층(매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암)에 대한 두께 정보가 이용되었다. 더불어 공간 분포 VS 정보도 필요하게 되는데, 대상 시범 지역 내에서는 현장 및 실내 시험을 통한 VS 획득 자료가 확보되지 못했다. 이에 본 연구에서는 기반암 상부 토사 지층을 매립토를 포함하는 퇴적토와 풍화잔류토 및 풍화암으로 구성되는

풍화대로 이분화하여 구분하고, 각 지층의 대표적 VS 값을 국내 내륙 지역에 대해 제시된 기존 값인 330 m/s와 550 m/s로 각각 채택하였다(Sun, 2004; Sun 등, 2005). 이러한 기저 자료를 토대로 GIS 기반의 GTIS 구축을 통해 서울 시범 평야 지역의 부지고유 지진 응답 특성으로 제시된 부지 주기의 정밀구역화 결과는 그림 8과 같다. 구역화된 부지 주기 정보에 대한 상대적 공간 위치 확인을 위해 지표상 배치의 수계 및 건물 레이아웃도 가시적으로 중첩 제시하였다. 그림 8의 부지 주기는 지역 내 임의 위치에서의 부지고유 지진 응답을 예측할 수 있는 지표이며, 대상 지역의 서부나 남서부의 구릉지를 제외하고는 대부분 영역에서 부지 주기는 약 0.2 초에서 0.4 초의 범위를 보인다. 따라서 층수에 따른 건물 고유 주기를 0.1 초로 고려해 볼 때(Kim 등, 2002; Sun, 2004), 2 층에서 4 층 정도 건물의 지진시 공진 가능성 및 그에 따른 지진 취약성을 예측할 수 있다. 대상 지역이 주로 주거 영역임을 감안해 볼 때, 2 층에서 4 층 정도의 조적조 건축물들에 대한 내진 성능 평가 및 보강이 필요할 것으로 판단된다.

부지 주기의 지역적 평가는 대상 지역에 위치한 구조물의 지진 취약도 예측 뿐만 아니라 지반 분류를 통한 설계 지반 운동 결정(건설교통부, 1997)에도 활용될 수 있다. 즉, 부지 특성 주기에 따른 지반 분류를 수행하고(Sun, 2004; 윤종구, 2006), 그에 따른 지반 증폭 계수(site amplification factors 또는 site coefficients)를 산정함으로써 내진 설계를 위한 지반

운동의 결정이 가능하다. 그림 9는 Sun(2004)이 제시한 국내 내륙 지역에 대한 지반 분류 체계의 여러 분류 기준 중에서 부지 주기를 토대로 GTIS 내에서 시범 지역을 지반 분류하여 가시화한 것이며, 서울 시범 지역의 경우 거의 모든 부지가 현행 지반 분류 C 및 D에 해당되었고 그 중에서도 동쪽의 하천 부근 영역은 주로 D 지반으로 분류되었다. 특히, Sun(2004)은 부지 주기 약 0.15 초를 기준으로 현행 지반 분류 C를 풍화암 및 매우 견고한 토사(Weathered Rock and Very Stiff Soil)와 중간 정도 견고한 토사(Intermediate Stiff Soil) 지반으로 세분하였으며, 현행 지반 분류 D 조건인 깊은 견고한 토사(Deep Stiff Soil) 지반과 지반 분류 C는 부지 주기 약 0.28 초로 구분된다. 이러한 지반 분류 정보를 토대로 대상 지역 내 모든 부지에서의 지반 증폭 계수 산정 및 그에 따른 설계 지반 운동의 결정이 가능하다. 또한, 구축된 지역적 부지 주기 분포 정보는 지역 내 단지 신규 개발이나 재개발 시 부지 효과를 고려한 시설물 단지 계획의 설정과 같은 도시 개발 의사 결정의 기초 정보로서 뿐만 아니라 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 분류 기준으로 활용하여 지역 내 임의 부지에서의 내진 설계를 위한 예비 정보로서도 활용 가능하다. 본 연구에서 수행한 서울 시범 지역의 지진 응답 특성 예측을 위한 정밀구역화 절차 및 결과는 향후 추진될 서울 전체 지역 대상의 정밀구역화의 모범 방안으로 적용 가능할 것이다.

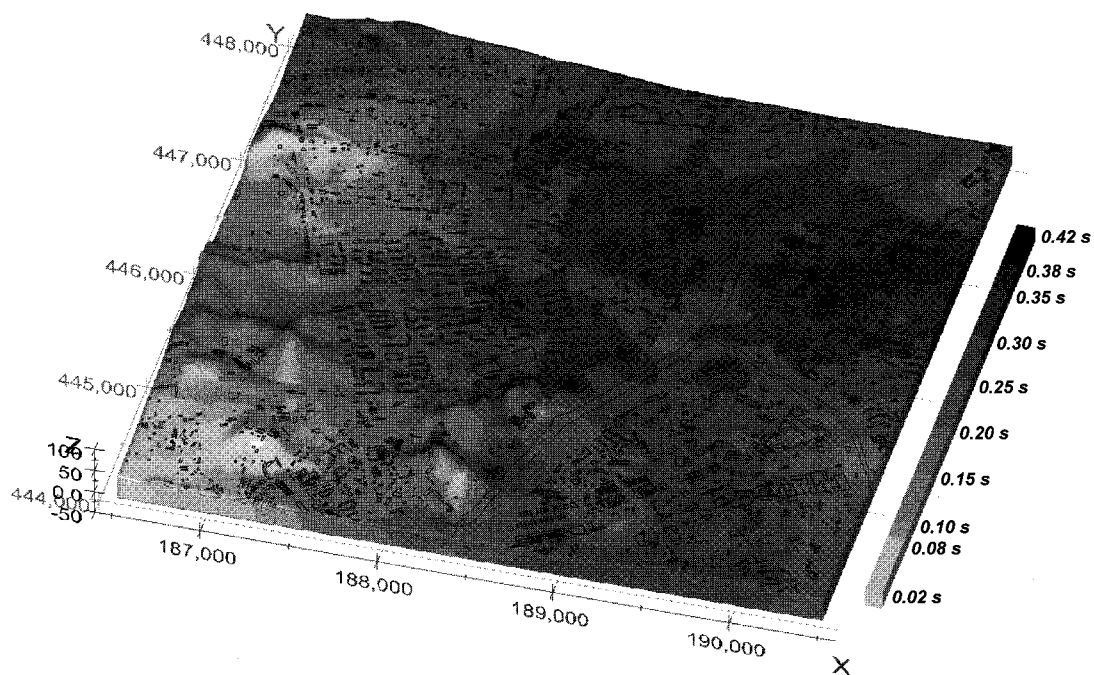


그림 8. 서울 시범 지역의 부지 주기에 대한 정밀구역화

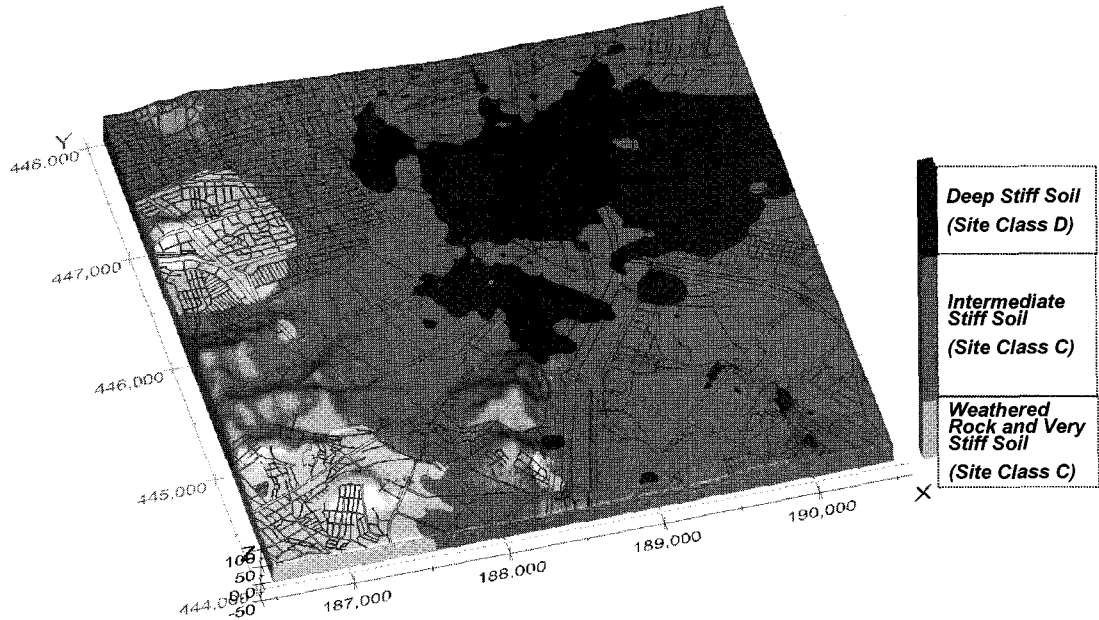


그림 9. 서울 시범 지역의 부지 주기에 따른 지반 분류 정보

## 6. 결론 및 제언

국내 대표적 대도시인 서울 지역에 대한 지진 재해 평가와 대책 수립의 일환으로, 서울 전체 지역에 대한 기존 지반 조사 자료 분포 현황을 파악하고 시범 지역을 선정하여 GIS 기법 토대의 GTIS를 구축하고 부지고유 지진 응답에 관한 정밀구역화를 수행하였으며, 본 연구 과정을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 서울 및 주변 지역의 기존 지반 조사 자료에 대한 분포 현황 파악을 위해 10,751 개 지반 조사 위치에 관한 DB를 구축하였고, 구축 DB를 토대로 서울 전체 지역을 대상으로 지반 조사 위치 정보 시스템을 구축하였다. 위성 영상의 중첩 및 삼차원 가시화를 통해 서울 지역의 지형 특성에 따른 기존 지반 조사 자료의 분포 현황을 효율적으로 파악하였다.
2. 서울 전체 지역의 지반 조사 위치 정보 시스템을 기반으로 지형적으로 평야 특성을 보이는 서울 지역 내의 4 km × 4 km 면적의 남서부 영역을 시범 지역으로 선정하여, 영역 내 307 개 기존 지반 조사 자료들의 지층 구분 및 DB 구축을 실시하고 지구통계학적 크리깅 기법을 통해 시범 지역 전체에 대한 공간 지층 정보를 보간 예측함으로써 GTIS를 구축하였다. 지층 정보에 관한 GIS 기반의 GTIS로부터 시범 지역의 지형 특성과 관련된 지하 토사 두께 변화를 확인하였다. 또한, 실무적 활용 목적의 지층 두께 정보에 관

한 대표적 사례로서 기반암 심도에 관한 지표 투영 형태의 삼차원 공간 분포 지도를 정밀구역화 수준으로 구축 제시하였다.

3. 서울 시범 지역에 대해 구축된 GTIS의 공간 지층 정보를 이용하여 부지고유 지진 응답 특성의 지역적 예측을 위한 부지 특성 주기의 정밀구역화를 수행하였으며, 이로부터 대상 지역 전체에 대한 부지별 지진 응답 특성을 확인하였다. 더불어 부지고유 지진 응답에 따른 대상 시범 지역 내 2 층에서 4 층 건축물의 지진 취약성을 직관적으로 예측할 수 있었다. 뿐만 아니라 GTIS 내에서 부지 주기에 따른 지반 분류를 수행함으로써 대상 시범 지역의 모든 부지들에 대한 지반 증폭 계수 산정 및 설계 지반 운동 결정이 가능한 정보를 제공하였다. 본 연구의 시범 지역에 대한 부지고유 지진 응답 예측 목적의 정밀구역화 기법은 서울 전체 지역의 정밀구역화 및 그에 따른 종합적 지진 방재 대책 수립으로 확대 적용될 수 있을 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본 사업인 '실시간 지진 분석 및 지진 재해 정량적 예측기술 개발'과제의 지원과 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반 건설) 사업단 및 서울대학교 공학연구소의 연구 협조로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부 (1997) 내진설계기준연구(III). 한국지진공학회.
- 건설교통부 (2002) 국토건설 종합지반정보 DB구축 및 활용시스템 개발. 완료보고서.
- 서울대학교 (2002) 웹기반 지반정보시스템의 지반공학 적 기능구현 방법에 관한 연구.
- 선창국, 양대성, 정충기 (2005) 서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가. 한국지진공학 회 논문집, 제9권, 4호, pp. 29-42.
- 선창국, 정충기 (2006) GIS를 이용한 지반-지식 기 반 지반 정보화 시스템 구축 기법의 개발 및 적용, 한국지반공학회 논문집, 제22권, 제2호, pp. 55-68.
- 윤중구 (2006) 국내 지반 특성에 적합한 지반분류 방 법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구, 박사학 위논문, 한국과학기술원.
- 천성호, 선창국, 정충기 (2005) 지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용, 대한토목학회 논문집, 제25권, 제2C호, pp. 103-115.
- 한국지질자원연구원 (2002) 충남 지진대비 종합대책 수립 연구. 충청남도.
- 한국지질자원연구원 (2007) 지진자료실, <http://www.quake.kigam.re.kr>, 2007년 1월 23일 접속.
- Autodesk (2006) *AutoCAD 2007 Manuals and Application Books*.
- CTech (2006) *EVS/MVS Manuals*, Version 8.2.
- Fah, D., Kind, F., Lang, K. and Giardini, D. (2001) Earthquake scenarios for the city of Basel," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, No. 5, pp. 405-413.
- ISSMGE (1999) *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*. Revised Version, Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Kim, D.S., Chung, C.K., Sun, C.G. and Bang, E.S. (2002) Site assessment and evaluation of spatial earthquake ground motion of Kyeongju, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 371-387.
- Kunapo, J., Dasari, G.R., Phoon, K.K. and Tan, T.S. (2005) Development of a web-GIS based Geotechnical Information System, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 19, No. 3, pp. 323-327.
- NIBS (2002) *A Guide to Using HAZUS for Mitigation*, National Institute of Building Sciences, Federal Emergency Management Agency.
- Sun, C. G. (2004) *Geotechnical Information System and Site Amplification Characteristics for Earthquake Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
- Sun, C.G. and Chung, C.K. (2006) Site effects of shallow and wide basin based on 2-dimensional modeling within spatial geotechnical information system, *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Engineering*, Taipei, CD-ROM, Paper No. 252.
- Sun, C.G., Kim, D.S. and Chung, C.K. (2005) Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea, *Engineering Geology*, Vol. 81, No. 4, pp. 446-469.

◎ 논문접수일 : 2007년 08월 13일  
 ◎ 심사의뢰일 : 2007년 08월 14일  
 ◎ 심사완료일 : 2007년 09월 06일