

# GIS 기반의 지반 정보 시스템 구축을 통한 경주 지역 부지고유 지진 응답의 지역적 평가

선창국<sup>1\*</sup>·정충기<sup>2</sup>

## Regional Estimation of Site-specific Seismic Responses at Gyeongju by Building GIS-based Geotechnical Information System

Chang-Guk SUN<sup>1\*</sup>·Choong-Ki CHUNG<sup>2</sup>

### 요 약

부지고유 지진 응답과 그에 따른 지진 재해는 지하 지질 및 지반 동적 특성에 따라 주로 영향을 받는다. 본 연구에서는 지진 응답의 신뢰성 높은 평가를 목적으로, 연구 영역을 포괄하는 확장 영역과 지표면의 지반-지식 자료 획득을 위한 추가 부지 방문 조사라는 새로운 개념을 도입하여 GIS 토대의 지반 정보 시스템(GTIS)을 개발하였다. 역사 지진 피해 기록이 많아 향후 지진 발생 가능성 높은 경주 지역에 대해 GIS 기반 GTIS를 구축하였다. 연구 지역인 경주를 대상으로 지반 특성 및 동적 물성을 대표하는 전단파속도( $V_s$ )를 평가하기 위한 종합적 지반 조사와 기존 지반 자료 수집을 실시하고 부지 방문 조사를 추가적으로 수행하였다. 경주 지역에 대한 GTIS 내에서 지구통계학적 크리깅 기법을 이용하여 지반 조사 자료로부터 연구 영역 전체의 공간 분포 지층과  $V_s$ 를 신뢰성 높게 예측하였다. GTIS 내에서 예측된 공간 지층 및  $V_s$ 를 토대로, 부지 효과에 따른 부지고유 지진 응답의 평가 지표인 부지 주기( $T_G$ )에 관한 지진 구역 지도를 경주 연구 지역에 대해 작성하였다. 경주의 공간  $T_G$  분포 지도로부터 2 층에서 5 층 건물의 지진 취약도를 확인하였다. 본 연구에서는 GIS 기반 GTIS 내에서  $T_G$ 를 토대로 수행된 지진 구역화를 지진 재해 평가 및 저감을 위한 효율적 지역 대책 방안으로 제시하였다.

주요어 : 지반 정보 시스템, GIS, 부지고유 지진 응답, 지진 구역화, 부지 효과, 부지 주기

### ABSTRACT

The site-specific seismic responses and corresponding seismic hazards are influenced mainly by the subsurface geologic and geotechnical dynamic characteristics. To estimate reliably the seismic responses in this study, a geotechnical information system (GTIS) within GIS framework was developed by introducing new concepts, which consist of the extended area containing

2008년 3월 7일 접수 Received on March 7, 2008 / 2008년 5월 8일 수정 Revised on May 8, 2008 / 2008년 5월 13일 심사완료  
Accepted on May 13, 2008

1 한국지질자원연구원 지진연구센터 Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

2 서울대학교 건설환경공학부 School of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

\* 연락처 E-mail : pungsun@kigam.re.kr

the study area and the additional site visit for acquiring surface geo-knowledge data. The GIS-based GTIS was built for Gyeongju area, which has records of abundant historical seismic hazards reflecting the high potential of future earthquakes. At the study area, Gyeongju, intensive site investigations and pre-existing geotechnical data collections were performed and the site visits were additionally carried out for assessing geotechnical characteristics and shear wave velocity ( $V_s$ ) representing dynamic property. Within the GTIS for Gyeongju area, the spatially distributed geotechnical layers and  $V_s$  in the entire study area were reliably predicted from the site investigation data using the geostatistical kriging method. Based on the spatial geotechnical layers and  $V_s$  predicted within the GTIS, a seismic zoning map on site period ( $T_G$ ) from which the site-specific seismic responses according to the site effects can be estimated was created across the study area of Gyeongju. The spatial  $T_G$  map at Gyeongju indicated seismic vulnerability of two- to five-storied buildings. In this study, the seismic zonation based on  $T_G$  within the GIS-based GTIS was presented as regional efficient strategy for seismic hazard prediction and mitigation.

**KEYWORDS** : *Geotechnical Information System, GIS, Site-specific Seismic Response, Seismic Zonation, Site Effects, Site Period*

## 서론

현대 사회에서는 고전적 의미의 도시 형성 과정이 급속한 산업 발달에 따른 주요 거점 도시의 인구 집중 현상으로 변화되어 왔다. 이에 따라 대도시 뿐만 아니라 중소 도시 지역에서도 종합적 재해 대책 수립을 통한 체계적 의사 결정의 중요성이 최근 강조되고 있다. 특히, 지진 재해는 시간 및 공간적 측면의 사전 예측이 모두 불가능하고 그 범위가 방대하므로, 도시와 같이 인구와 시설이 밀집된 지역에서의 지진 발생에 따른 피해는 상상을 초월할 수 있다. 이와 같은 도시 지역 지진 피해 사례는 최근 발생한 Pakistan의 Kashmir 지진 (Durrani 등, 2005)을 포함하여 과거 여러 해의 발생 지진 사례들로부터도 확인할 수 있다 (Sun, 2004). 인간이 생활하는 부지에서 지진 시 직접 경험하는 지반 운동은 지진 발생원인 단층의 특성에 따른 진원 효과(source effects), 진원부터 부지까지의 광역적 전달 매체의 특성에 따른 경로 효과(path effects), 그리고 부

지에서의 국부적 지반 특성에 따른 부지 효과(site effects)에 의해 결정된다. 즉, 지표면 부근 지진동의 크기 및 형태는 진원이나 진앙으로부터 동일 거리의 부지들 일지라도 부지 효과와 관련된 기반암부터 지표면까지의 지질 조건 및 지반 동적 특성에 따른 응답 거동별로 달라질 수 있다. 일반적으로 지진 피해가 발생한 도시 지역 내 재해 정도의 공간적 분포 경향은 주거 및 산업의 밀집도나 구조적 취약도와 더불어 근본적으로 지반의 지진 민감도인 부지 효과와 직접 관련이 있다. 대개 지진파는 기반암 상부 토사 지반의 통과 과정 중에 증폭되고 부지 고유의 지반 특성에 따라 그 정도는 다르게 나타나므로, 지반 특성의 올바른 평가에 기반한 부지고유 지진 응답의 예측은 지역적 지진 방재를 위한 가장 기초적이고 중요한 사항이라고 할 수 있다.

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 생성 및 축적되고 있다. 지역 내에 분포하는 지반 조사 자료를 이용한 지반 특성의 공간적 예측과 그를 통한 지진 방재 측면의 활용을 위해서는 복합적 속성 형태의 자료를 체계적으로 관리할 수 있는 효율적인 운용 체계가 반드시 필요하다. 이러한 기능을 충족할 수 있는 기법으로서 최근 그 적용성이 더욱 고차원화 되고 있는 지리 정보 시스템(geographic information system, GIS)이 전 세계적으로 다양한 학문 분야에서 광범위하게 도입 활용되고 있다(Kunapo 등, 2005; Sun, 2004). 특히, 지진과 같은 자연 재해에 대한 합리적 대응 방안 수립의 일환으로 GIS 기법이 광범위하게 효율적으로 적용되고 있으며, 국내에서도 재해 대책 수립을 위한 다양한 응용 시스템들의 개발 구축에 관한 연구가 수행되어 왔다(정대영 등, 2002; 백동승, 2004). 그럼에도 불구하고 지반 및 지진공학 분야에 대한 현재까지의 GIS 활용 사례를 살펴보면, 제한된 자료의 극대화를 통한 공간 지반 정보의 합리적 예측과 이를 토대로 한 지진 재해의 효율적 예측 평가와 같은 적극적 활용 보다는 주로 데이터베이스(database, DB)의 구축을 통한 자료 관리 및 가시화와 같은 소극적 활용에 집중되어 왔다(장용구 등, 2007; Sun, 2004).

본 연구에서는 이러한 기존의 지반 및 지진 공학적 GIS 활용 기법의 개선을 통한 GIS 기반 지진 방재 체계 합리화의 일환으로, 지역적 지반 정보의 효율적 관리와 더불어 공간상에 분포하는 지반 정보의 신뢰성 높은 예측을 위한 지반 정보 시스템(geotechnical information system, GTIS) 구축 기법을 개발하였다. 더불어 국내의 대표적 내륙 도시이자 역사 지진 피해 사례가 다수 기록된 고도인 경주 지역을 대상으로 개발된 구축 기법을 적용하여 차별적이고 종합적인 지역적 GTIS를 구축하고, 이를 토대로 지역 전체에 대한 부지고유의 지진 응

답 특성을 평가함으로써 효율적인 지역적 지진 방재 시스템의 근본적인 윤곽을 제시하고자 하였다.

## 지반 정보 시스템 구축 기법 개발

대규모 복합 속성 자료의 대표적 형태인 지반 정보는 지표 및 지하 공간의 삼차원적 분포 특성을 보인다. 이러한 공간 분포의 지반 정보를 효율적으로 관리하고 활용하기 위하여 GIS 기법 토대의 여러 지반공학적 시스템들이 근래에 개발되어 왔으며(건설교통부, 2002; Scott와 Carlton, 1999), 지반 지리 정보 시스템(geotechnical geographic information system, GEOGIS)이나 지반 자료 관리 시스템(geotechnical data management system, GDMS)과 같은 여러 전문 용어로 불리어 왔다(Williams 등, 2002; Geodecisions, 2004). 특히, 도시 지역을 대상으로 지반 자료의 종합 관리와 더불어 지진, 홍수 등의 재해 대책 수립을 위한 기본 방안으로 최근 국내외에서 광범위하게 지반 정보 GIS가 개발·구축되고 있다(유환희 등, 2002; Rockaway, 1997; Lee와 Choi, 2003; Sun, 2004). 지반 정보는 그 의미와 내용에 있어서 매우 다양한 정보를 포괄하며, 그 중에서도 지반 특성을 파악하기 위해 근본적으로 활용되는 가장 중요한 정보는 지층 정보이다(천성호 등, 2005). 지층 정보의 정확한 예측을 통해 지반 특성의 체계적이고 종합적인 파악이 가능하고 이를 토대로 보다 신뢰성 높은 부지고유 지진 응답 평가가 이루어 질 수 있으므로 본 연구에서는 대상 지역 내 지층의 공간적 분포에 대한 합리적 예측 기법을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 공간 지층 정보의 신뢰성 높은 예측과 이에 따른 지진 재해 관련 부지 효과의 공간 분포 예측 평가를 목적으로 GIS 토대의 지반 정보화 시스템(GTIS)을 개발 구축하였으며, 이러한 GTIS는 지반공학 및 지진공학 분야에서의 다양한 적용이 가능하다.

지반을 구성하는 재료는 그 특성에 따라 여러

층으로 구분될 수 있으며, 이를 지층(geotechnical layer 또는 geo-layer)으로 일컫는다(천성호 등, 2005; 선창국과 정충기, 2006; Sun, 2004). 지층은 학문적 활용 분야나 전문가적 관점에 따라 분류 방법이나 기준이 매우 다양하다(Sun, 2004). 현장에서의 일반적인 조사 형태인 시추 조사 시에는 지질학 및 지반공학 관점의 지층 세분화를 통해 시추 주상도를 제시하게 되며, 본 연구에서 조사하거나 수집한 자료도 이러한 형태로 확보되었다. 그러나 본 연구에서는 지반지진공학 전문가적 견지의 세부 지층 병합 및 대표화를 통한 실무적 보편성 확보와 직관적 정보 제공을 위하여, 지층을 매립토(fill), 퇴적토(alluvial soil 또는 deposited soil), 풍화잔류토(weathered residual soil), 풍화암(weathered rock), 그리고 연암 또는 그 이상 정도의 암반을 포함하는 기반암(bed rock)의 총 5 종류로 구분하였다(선창국과 정충기, 2006). 대체적으로 지반은 지질학적 형성 과정에 따라 각 지층이 깊이에 따라 특정 순서로 분포하게 되는데, 하부에서부터 기반암, 풍화암, 풍화잔류토, 퇴적토 그리고 매립토의 순서가 일반적이다. 또한, 각 지층의 형성 과정을 살펴보면, 기반암의 풍화 작용에 의해 풍화암과 풍화잔류토가 발달하게 되고(선창국 등, 2006), 퇴적토의 경우 외부 토사의 유입 퇴적 작용 그리고 매립토의 경우 인위적인 조성에 의해 형성된다. 이러한 각 지층의 생성 및 발달 과정은 공간적 지층 분포의 합리적 예측을 위한 기본 지식으로 활용될 수 있다.

지역적 지반 특성의 합리적 예측을 통한 부지고유 지진 응답의 평가 목적으로 본 연구에서 구축한 GIS 기반의 지반 정보 시스템(GTIS)의 전체 구성은 그림 1과 같으며, 3개의 일반 GIS 구성 요소와 1개의 추가적인 지반지진 전문가적 요소로 이루어져 있다. 이 중 데이터베이스(DATABASE) 요소 내에는 일반적인 시추 조사 자료 및 지반 동적 특성과 같은 현장 시험 자료 그리고 한반도 내륙 지역

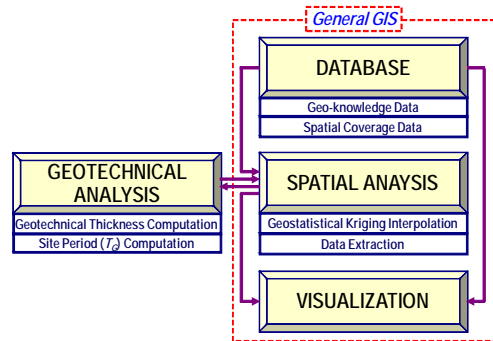


FIGURE 1. GIS 기반 지반 정보 시스템의 전체 구성

의 층서학적 특성을 고려한 지형 분석 및 현장 답사로부터 추가 확보한 지표 지층 자료로 구성되는 지반-지식 자료(geo-knowledge)가 포함되어 있고, 지표 분포 형태의 시설물이나 지형 속성과 같은 자료(spatial coverage data)도 포함되어 있다. 공간 분석(SPATIAL ANALYSIS) 요소에서는 지층 발달(landform) 특성별 베리오그램(variogram) 모델을 차별적으로 적용하는 개선된 지구통계학적 크리깅(Geostatistical kriging) 기법으로 자료의 공간 영역에 대한 예측을 수행하여 광범위한 영역에 대한 지반 특성의 공간 정보화 시스템을 구축 가능케 하였다. 또한, 보관 자료 추출(data extraction)을 통한 정보의 추가적 활용이 가능하다. 가시화(VISUALIZATION) 요소는 GIS 기법의 가장 두드러진 기능으로서 정보 기술의 발달에 따라 이차원이나 삼차원뿐만 아니라 시간에 따른 사차원 가시화도 가능하다. 이와 같은 3 종류의 일반 GIS 요소들과 더불어 부지고유 지진 응답을 예측 평가하기 위해 본 연구에서 지반지진공학 전문가 기법 적용을 통해 추가 구성한 지반 분석(GEOTECHNICAL ANALYSIS) 요소 내에서는 지층 두께 연산(geotechnical thickness computation) 및 이를 통한 기반암 심도(bedrock depth) 연산을 수행하며, 연산된 지층별 두께와 지반 동적 특성인 전단파속도

TABLE 1. 지반-지식 개념을 적용한 지반 정보화 시스템 구축 과정

진행단계	단계별 수행 내용
1단계	대상 연구 지역(study area)을 포함하는 확장 지역(extended area) 선정
2단계	확장 지역 내 유용 가능한 현장 지반 조사 자료와 지형, 지질 및 지층 자료의 확보 및 예비 분석
3단계	지형 분석(terrain analysis) 토대의 국지적 지층 발달 특성 결정
4단계	확장 지역의 지질과 지형 특성에 따른 영역화
5단계	연구 대상 지역 내 시추 조사 및 현장 시험 부지 선정
6단계	시추 조사 및 지반지진공학적 현장 시험 수행
7단계	확장 지역 내 지표면 지층 자료 획득을 위한 추가적인 부지 지표 조사(site visit)
8단계	기존 및 수행된 지반 조사 자료와 추가 획득된 지표면 지층 자료를 이용한 지반-지식 데이터베이스 구축
9단계	확장 지역에 대한 지층 정보의 내삽 및 외삽 보간을 통한 공간 정보 예측
10단계	보간된 확장 지역의 지층 정보로부터 연구 대상 지역의 지층 정보 추출

(shear wave velocity,  $V_s$ )를 종합 활용하여 부지 주기(site period,  $T_G$ )를 결정한다.

공간 GIS 기법을 활용한 GTIS 구축시 대상 영역에 대한 공간 지층 정보의 보간 예측에서는 기반암 상부에 존재하는 네 종류 지층(매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암)의 하부 경계면(interface)과 지표면(surface)을 크리깅 보간 연산하게 된다. 이로부터 결정된 지표면 및 경계면 좌표를 토대로 각 지층의 공간 좌표를 부여하고 가시적으로 출력하게 된다. 그림 2는 본 연구의 GTIS 내에서 공간 지층 정보를 보간 예측하고 가시화하기 위한 지표면 및 지층

별 경계면의 구성과 그 과정을 개요적으로 도시한 것이다. 지표 및 지하 지형 변화가 심하거나 자료가 부족한 대상 지역의 경우, 평면 좌표를 기준으로 지층별 두께 자료를 보간 예측하는 방법이 경계면과 같은 표고 자료를 보간 예측하고 지층 두께로 환산하는 방법에 비해 이차원 평면상의 지층 두께 예측에서는 부분적으로 정확도가 높고 추가 환산 과정이 필요 없으므로 효율적일 수 있다(선창국 등, 2006; 천성호 등, 2005). 그러나 본 연구와 같이 삼차원 공간 자료의 예측을 통한 가시화의 경우 지층 두께 자료를 이용한 보간 예측 방법은 지층 경계면의 절대 표고를 보간 연산의 기지 값과 예측 값으로 하는 방법에 비해 공간 자료 재생성을 위한 추가 연산이 필요하므로, 정해진 대상 영역 내에서 자료 수가 많아질수록 효율성 및 합리성이 떨어진다.

기존의 일반적인 지반 정보 GIS는 대상 영역 내 확보된 지반 조사 자료만을 데이터베이스(DB)화하여 영역 전체의 지층 정보를 예측하므로, 자료가 부족한 소영역에서는 예측된 지층 정보의 오류가 발생하게 된다. 특히, 대상 영역의 경계부나 자료가 상대적으로 부족한 산지나 구릉지에서는 암반을 토사로 예측하는 경우도 발생할 수 있다. 이와 같은 공간

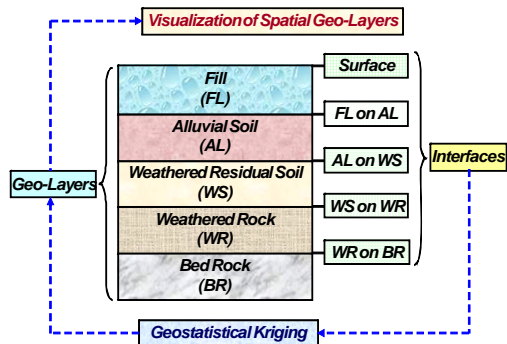


FIGURE 2. 지층과 경계면 구성 및 자료 보간을 통한 공간 지층 정보 가시화 흐름

지반 정보 예측 오류를 최소화하고 신뢰성 높은 지반 정보를 예측하기 위하여 본 연구에서는 지반-지식 개념을 적용한 GTIS 구축 기법을 개발하였으며, 개발된 기법의 구축 과정은 표 1에 제시한 바와 같다. 지반-지식 개념 기반의 GTIS 구축 기법에서는 연구 대상 영역(study area)을 포함하는 확장 영역(extended area)에 대해 다양한 문헌과 지질 및 지형 특성 분석을 수행한 후, 지반 조사 자료 부족 소영역에서의 현장 지표 조사로부터 GPS(Global Positioning System)를 이용한 절대 좌표 기반의 추가 지표 지층 자료를 획득하여 기존 지반 조사 자료와 함께 지반-지식 DB를 구축하게 된다. 확장 영역 대상의 지반-지식 DB를 토대로 공간 지층 정보를 예측하고, 이로 부터 연구 대상 영역의 지층 정보를 추출하게 된다. 이 과정에서는 확장 영역에 대해 추가 획득한 지표면 지층 자료로 인해 자료 부족 영역에 대한 지층 정보 예측의 신뢰도가 높아질 뿐만 아니라 연구 대상 영역 전체에 대해서는 외삽(extrapolation)에 비해 예측 신뢰성이 높은 내삽(interpolation) 방법만을 적용하여 공간 지층 정보를 예측할 수 있다(선창국 등, 2006).

## 경주 지역에 대한 지반 정보 시스템 구축

개발된 지반-지식 개념 기반의 GTIS 구축 기법의 지역적 적용을 위해 국내 내륙의 경주(Gyeongju) 지역을 선정하고, 경주 지역의 지반-지식 관련 자료를 확보하여 사전 분석을 실시하였다. 특히, 경주 지역은 역사 문헌들에 의하면 빈번하게 큰 지진 피해가 발생했던 지역일 뿐만 아니라 최근에도 중소규모의 지진들이 발생해 온 지역으로서(과학기술부, 2000; 선창국 등, 2005; Sun 등, 2005), 지진학계에서 활성화 가능성이 제기되고 있는 양산 단층과 인접하고 있다. 고찰한 여러 상황을 복합적으로 고려해 볼 때, 경주 지역은 향후 지진 발생 및 그에 따른 피해 가능성이 매우 큰 지역으

로 추정해 볼 수 있으며, 이러한 측면의 지진 공학적 중요성에 따라 본 연구에서는 경주 지역을 연구 대상으로 선정하였다. 대상 지역의 기존 자료 중 시추 조사 결과는 깊이에 따라 매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암 및 기반암으로 구분하였으며, 사전 분석 결과를 토대로 기존 자료가 부족한 곳에서는 지반 조사를 직접 수행하였다. 또한, 기존 및 수행 지반 자료가 부족한 영역에 대해서는 추가적인 현장 부지 지표면 조사를 통해 지표 지층 자료를 획득하였다. 수집 및 수행된 지층 자료와 추가 획득된 지표 지층 자료를 지반-지식 데이터베이스(DB)로 구축하고 수치 전자 지형도로부터의 지표상 배치 요소들의 DB를 구성하여 대상 경주 지역의 지반 정보 시스템 구축을 위한 기저 자료를 체계적으로 준비하였다.

### 1. 경주 지역의 지반공학적 자료 분포

경주의 GTIS 구축 대상 연구 영역은 도심지를 포함하는 6km×6km 영역, 그리고 확장 영역은 연구 대상 영역을 포괄하는 확장 영역(7.05km×8.30km)으로 선정하였다. 도시와 같은 영역적 제한 대상에 주로 적용되는 TM(Transverse Mercator) 평면 좌표계 상의 미터(meter) 단위로 확장 영역은 서쪽에서 동쪽으로 215,560에서 222,610 그리고 남쪽에서 북쪽으로 255,910에서 264,210에 걸쳐있고, 연구 영역은 서쪽에서 동쪽으로 216,310에서 222,310 그리고 남쪽에서 북쪽으로 257,660에서 263,660에 걸쳐있다. 본 연구에서는 지반-지식 개념 기반의 GTIS 구축 과정(표 1 참조)에 따라 확장 영역에 대한 지형도, 지질도, 기존 시추 조사 및 지반 관련 시험 자료, 고문헌 등의 지반-지식 관련 자료를 수집 고찰하고, 대상 경주 지역의 전반적인 지형, 지질 및 지반 특성을 파악하였다. 경주의 기반암은 대부분 퇴적암류와 이를 관입한 화강암으로 구성되어 있고, 하천에 인접한 평지와 산기슭에는 퇴적토가 발달되어 있는 것으로 파악되었다. 또한, 확장

영역의 지형 분석 결과, 경주 지역은 평야와 낮은 구릉 지역에 형성된 시가지와 인근 전답 지역을 주변 산들이 둘러싸고 있는 분지로 이루어져 있으며, 산을 끼고 흘러나온 여러 지천이 중심부의 형산강과 합류하여 흐른다. 따라서 전체 경주 지역의 지형 및 지반은 하천에 의한 영향을 크게 받아 퇴적도가 두껍게 발달하고 있을 것으로 보이며, 수집된 기존 시추 자료에서도 두꺼운 퇴적층을 확인할 수 있었다.

지반-지식 관련 자료의 종합 분석 결과를 토대로 산지, 구릉지 및 평야로 지형을 구분하고, 지표 부근 지질 역시 광역적으로 구분하였다. 구분 영역별 기존 시추 및 지반 조사 자료의 존재 여부를 고려하여 본 연구에서 수행할 지반 조사 부지의 위치를 결정하고, 시추 조사 및 지반 특성의 종합적 평가를 위한 현장 탄성과 시험을 실시하였다(선창국 등, 2005). 기존 시추 조사 자료는 확장 영역 내에서 총 144공이 확보되었으며, 고속 철도 초기 조사 자료와 주변 교량 설계 조사 자료로 구성되며, 하천 및 계곡에 주로 분포하고 있다. 본 연구에서 실시한 지반 조사는 깊이별 지층 분포 파악을 위한 시추 조사와 대표적 지반 동적 특성인 전단파속도( $V_s$ ) 분포 획득을 위한 현장 탄성과 시험(in-situ seismic test)으로 구성되며, 대상 지역의 지형 변화를 고려하여 하천 5개소, 구릉 8개소와 평지 15개소의 총 28 부지에서 수행되었다. 이러한 기존 시추 조사 부지와 수행된 지반 조사 부지의 확장 영역 내에서의 지형 변화에 따른 지리적 위치를 고려하여, 자료가 부족한 영역에 대한 추가적인 현장 부지 지표 조사를 실시하고 지표면의 지층 자료를 획득하였다. 추가 부지 지표면 조사에 따른 지표 지층 자료 역시 매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암 또는 기반암으로 분류하였으며, 자료 획득 부지의 절대 좌표는 GPS와 수치 지형도를 기반으로 확보하였다. 경주의 확장 영역에 대해 확보된 기존 시추 조사 자료, 수행 지반 조사 자료 및 추가 부지 지표

조사에 의한 지층 자료는 모두 지반-지식 DB의 구성 자료로 활용되었다.

경주 확장 영역에 대한 지반-지식 DB 구성 자료의 지리적 분포 위치를 그림 3에 제시하였으며, GIS 소프트웨어를 이용한 지표 및 지하 지반의 반투명 가시화와 연구 대상 6km×6km 영역에 대한 지표상 배치 요소(하천, 도로, 등고선)의 중첩을 통해 자료의 지리 정보 파악을 용이하게 하였다. 일반적으로 삼차원 GIS 결과에서는 연직 방향 과장을 통해 명확한 가시성을 확보한다. 이에 본 연구의 결과에서도 연직 방향에 대해 3배 과장하여 제시하였다. 그림 3은 대상 경주 지역의 지리적 위치와 경주 확장 영역 내 분포 자료에 대한 절대 위치를 GIS 소프트웨어를 이용하여 삼차원 공간에 대해 가시적으로 제시한 것이며, 경주 연구 대상 영역의 지표면에는 지리적 영역 경계와 도시 특성 파악을 위한 목적으로 지표상 배치 요소들 중 하천, 등고선 및 도로를 중첩 제시하였다. 지반 조사 자료(site investigation data)는 깊이별 지층 분포 형태로 확인할 수 있는데, 기존 시추 조사 자료(pre-existing boring data)와 본 연구에서 수행된 지반 조사 자료로 구성된다. 또한, 추가 부지 지표면 조사로부터 획득한 5 종류의 지표 지층 자료 중 대표적으로 기반암 노두 자료만의 위치를 제시하였다. 부지 지표 조사 자료 분포 현황을

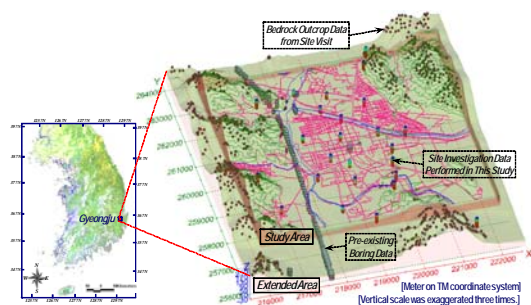


FIGURE 3. 경주 확장 영역에서의 지반 조사 자료 및 추가 확보된 기반암 노두 자료의 분포

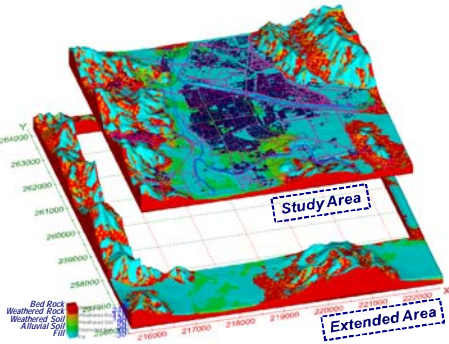


FIGURE 4. 경주 지역 공간 지층 정보의 보간 예측

모두 제시하지는 않았지만, 대체적으로 산지 내부나 정점 부근에 기반암 노두 자료가, 산지 경사부나 구릉에는 풍화암 또는 풍화잔류토가, 그리고 하천과 평지에는 퇴적토 및 매립토가 분포하고 있었다.

## 2. 공간 GIS를 활용한 경주 지역의 지반 정보 시스템 구축

경주 확장 영역에 대해 구축된 지반-지식 DB의 지층 자료를 토대로 확장 영역 전체의 공간 지층 정보를 보간 예측하여 연구 대상 영역의 종합적 지반 정보 구현을 위한 기초적 정보 시스템을 구축하였다. 자료의 공간적 확장 예측 시에는 지층별 발달 특성을 고려하기 위해 베리오그램을 차별적으로 도출 적용하여 지구통계학적 크리깅 보간을 수행하였다(천성호 등, 2005; 선창국 등, 2006) 경주 지역에 대한 공간 지층 정보는 이미 분류된 5 종류 지층으로 구분하여 보간 예측하였다. 확장 영역을 대상으로 보간된 지층 정보로부터 그보다 작은 영역인 연구 대상 영역의 지층 정보를 추출할 수 있으며, 확장 영역 전체에 고르게 분포하는 지반-지식 자료 토대의 보간 예측 과정 및 이러한 추출 과정을 통해 연구 영역을 대상으로 공간 확장 예측된 지층 정보의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 그림 4는 경주

지역 전체에 걸쳐 보간 예측된 공간 지층 정보를 가시적으로 제시한 것으로서, 확장 영역 전체의 공간 지층 정보로부터 연구 대상 영역의 정보를 추출하는 과정을 개념적으로 가시화하여 표현하였다. 경주 연구 영역의 지표면에서는 공간적 특성 구분을 위해 하천, 도로 및 건물 요소들을 중첩하여 제시하였다.

지층 정보와 함께 부지 효과 평가의 가장 중요한 지표인  $V_s$ 의 경우 본 연구에서 수행된 현장 탄성과 시험으로부터 경주 지역의 다양한 부지에 대해 심도 증가에 따른  $V_s$  변화 분포로 확보하여 기초적 DB로 구성하였으며, 확장 영역에 대한 부지 지표 조사 과정 중에 자료 부족 소영역에 대한 암반 노두의  $V_s$ 를 확보하여  $V_s$ 의 공간 보간 예측을 위한 DB에 추가하였다. 그림 5는 대상 확장 영역 내 다양한 부지의 현장 탄성과 시험으로부터 결정한 심도에 따른  $V_s$  분포와 추가적으로 획득한 여러 암반 노두  $V_s$  값을 토대로 GTIS 내에서 경주 연구 영역에 대해 보간 예측한  $V_s$ 의 공간 변화로서, 상대적 위치 기준으로 도로 요소 레이어를 중첩 가시화하였다. 이러한  $V_s$ 의 공간 분포는 기반암 심도를 고려한 토사 지층의 공간 분포와 함께 부지고유 지진 응답 특성 지표인 부지 주기( $T_G$ ) 산정의 공간 변수로 활용된다.

본 연구의 GIS 기반 GTIS 구축 기법은 기본적으로 대상 영역의 삼차원 공간 정보를 합리적으로 보간 예측하기 위하여, 기존에 일반

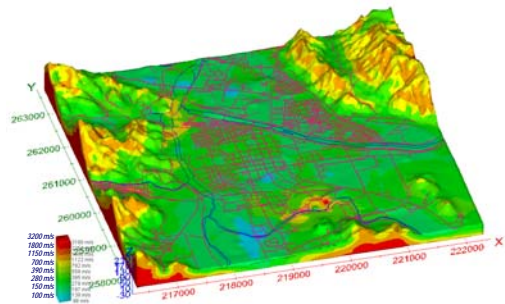
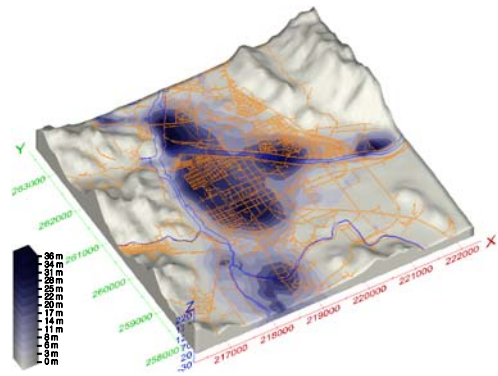


FIGURE 5. 경주 연구 대상 영역의 전단파속도 ( $V_s$ ) 공간 분포

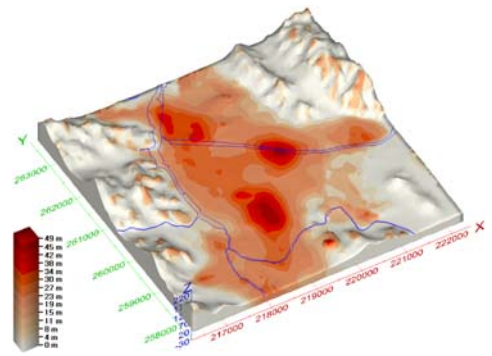


적으로 적용되어 온 단순 자료 기반의 일반적인 지반 정보 GIS와는 구분되는 차별적 기법으로 개발한 것이다. GTIS의 대표적 결과인 삼차원 공간 지층 정보(그림 4 참조)는 GIS 기법 토대 내에서는 가상적 현실성(virtual reality) 및 가시성이 뛰어날 수 있으나 실무적 활용성에 있어서는 제한적일 수 있다. 즉, 공간 지층 정보의 활용은 좌표 체계 기반의 수치 자료(digital data) 형태나 전문가적 GIS 기법을 통해서만 가능하므로 GIS 관련 비전문가인 건설 및 행정 실무자에게는 접근성이 결여될 수 있다. 이러한 실무적 활용성의 단점을 보완할 뿐만 아니라 공간적 가시성을 확보하기 위한 방법으로, 본 연구에서는 고전적인 기존 이차원 평면 등고 윤곽(contour) 지도를 대상 영역의 삼차원 지표면에 가시적으로 표현하는 기법을 GTIS 내에서 구현하였다. 지표면 투영 정보는 각 지층의 두께, 여러 조합 지층의 두께 합 또는 기반암 심도이며, 보간 예측된 지표면과 공간 지층 경계면의 좌표 정보를 이용하여 GIS 소프트웨어 내에서 추가적으로 연산하였다. 대상 정보의 위치별 연산 값은 해당 평면 좌표 위치의 지표면에 가시적으로 투영하여 실무적 유용성이 뛰어난 삼차원 지도로 제공되었다.

여러 대상 지층 정보 중 그림 6은 가능한 경주 지역의 주요 발달 지층인 퇴적토의 두께 분포와 지진 재해와 관련된 부지 효과의 평가에 있어서 중요한 고려 항목인 기반암 심도를 가시적으로 구현한 삼차원 지도이며, 상대적 위치 파악을 위해 각각 수계 및 도로 그리고 수계의 지표상 배치 요소들도 중첩 표현하였다. 그림 6(a)의 퇴적토 분포에서 쉽게 확인할 수 있는 바와 같이, 하천이 가로지르는 평야지에서 퇴적토가 두껍게 발달해 있고 최대 36 m 두께 정도로 분포하고 있다. 경주 지역 기반암 심도의 전반적인 분포 경향(그림 6(b))은 퇴적토 두께와 대체로 유사하게 나타나고 있으며, 이는 경주의 경우 기반암 상부 토사의 주요



(a) 퇴적토 두께 분포



(b) 기반암 심도 분포

FIGURE 6. 경주 지역의 퇴적토 두께 및 기반암 심도에 관한 지표면 투영 분포 정보

형성 작용이 기반암의 풍화라기보다는 하천퇴적 작용이기 때문이다. 경주 연구 대상 영역에서 기반암 심도는 분지내 평지에서 최대 약 49 m 깊이 정도로 예측되었고, 국내 내륙 지역의 기반암 심도로서는 비교적 깊은 분포를 보였다 (Sun 등, 2005). 본 연구의 지반-지식 기반 GTIS 내에서 구축된 이러한 지층 두께 및 기반암 심도 분포의 삼차원 지도는 탁월한 가시성이 확보된 자료로서, 연구 영역 내 모든 부지의 지반 특성 파악을 용이케 하므로 지역적 의사 결정과 같은 다양한 관리 분야에 활용될 수 있다.

## 경주 지역에 대한 부지고유 지진 응답의 지역적 평가

지진 발생시 지표면 부근 지반 운동은 국부적 부지 효과(site effects)에 따라 부지별로 운동의 크기와 주파수 성분이 매우 상이하게 나타난다. 즉, 기반암에 도달한 지진파는 토사층을 통과하면서 해당 부지고유의 동적 응답 특성에 따라 특정 주기(주파수) 성분의 지진파가 증폭되어 지표면에 도달하고, 구조물에 지진 하중으로 작용한다. 이러한 부지별 고유의 지진 응답 특성은 일반적으로 부지 주기( $T_G$ )로 대표되며(Kim 등, 2002; Sun 등, 2008), 부지고유 지진 응답 특성이 반영된 지반 운동은 구조물의 고유 주기 특성에 따라 공진 현상을 발생시킬 수 있다(Sun 등, 2005). 비록, 발생 지진을 고려한 정량적인 지진 응답을 평가하기 위하여 실제 지진 피해 기록에 근거한 경험적 기법이나 수치적 모델링(numerical modeling)에 근거한 해석적 기법이 적용되어 왔다 할지라도(Sun, 2004), 이러한 지진공학적인 현상적 특성에 따라 지반 특성 고려한 부지 주기를 토대로 부지고유 지진 응답을 간편할 뿐만 아니라 비교적 신뢰성 높게 평가하고 그에 따른 해당 부지에서의 구조물의 취약도와 같은 지진 재해를 평가할 수 있다. 특히, GIS의 광범위 영역에 대한 전체적 정보 제시 기능을 활용함으로써 대상 지역 전체에 걸친 부지고유 지진 응답을 가시적으로 확인할 수 있다. 따라서  $T_G$ 를 이용한 부지고유 지진 응답 평가 기법은 부지 응답 해석과 같은 수치적 기법 없이 구조물의 지진 취약도를 포함한 지역적 지진 재해의 예측에 직접 활용될 수 있다. 이러한 개념적 적용 가능성을 고려하여, 본 연구에서는 경주 연구 영역 전체를 대상으로 부지고유 지진 응답 특성 평가를 목적으로 GIS 기반의 GTIS 구축을 통한 지반 정보를 토대로 부지 주기에 대한 지표면 투영 정보 형태의 지진 구역화(seismic zonation)를 수행하였다.

### 1. 기반암 상부 지층 및 전단파속도의 공간 정보를 이용한 부지 주기 산정

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 최댓값을 보이는 기본 공진 주파수(fundamental resonance frequency,  $\omega_0 = 0.5\pi V_s/H$ )로부터 결정할 수 있다. 공진 주파수( $\omega_0$ )의 역수를 이용해 기반암 상부 단일 토사 지층 부지에 대한 부지 주기를 토사 지층의 강성인 전단파속도( $V_s$ )와 두께( $H$ )를 변수로 하는 식 (1)과 같이 산정할 수 있다. 그러나 대개 현장 지반은 강성이 다른 여러 토사 지층들로 구성되어 있으므로 부지 주기는 각 부지의 기반암까지의 지층 두께와 이의 전단파속도를 토대로 식 (2)와 같이 지층별 강성 변화를 고려하여 결정함으로써, 보다 합리적으로 부지 응답 특성을 예측 평가할 수 있다. 본 연구에서도 식 (2)를 이용하여 경주 지역에서의 부지 주기(단위는 초(s))를 산정하였다. 식 (2)에서  $D_i$ 와  $V_{si}$ 는 각각 기반암 심도( $H$ )까지의  $i$ 번째 지층의 두께( $H = \sum D_i$ )와 평균 전단파속도이다.

$$T_G = 4 \frac{H}{V_s} \quad (1)$$

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{si}} \quad (2)$$

부지 주기의 산정(식 (2) 참조)을 위해서는 해당 부지의 깊이별 지층 두께 분포 및 해당 지층의 전단파속도에 관한 정량적 값이 필요하다. 특히, 정해진 대상 영역 전체에 대한 부지 주기 산정을 위해서는 전체 영역에 대한 공간 지층 분포 정보가 우선 필요하며, 본 연구에서는 GTIS 구축을 통한 공간 지반 정보의 기반암 상부 4개 지층(매립토, 퇴적토, 풍화

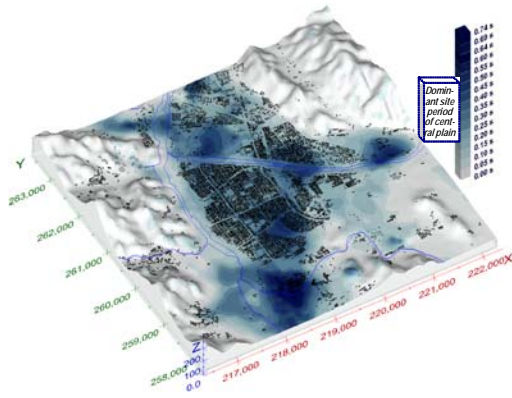


FIGURE 7. 부지 주기에 근거한 경주 지역의 부지고유 지진응답 예측평가

잔류토, 풍화암)에 대한 두께 정보를 부지 주기 산정의 기저 자료로 활용한다. 더불어 공간 분포 전단파속도 정보도 필요하게 되는데, 대상 지역에 대해 이미 구축된  $V_s$ 의 공간 분포 중 기반암 상부의  $V_s$  값만을 이용하여 부지 주기를 산정하게 된다. 대상 경주 연구 영역 전체에 걸친 공간 지층 및  $V_s$  정보는 제한된 자료를 토대로 GTIS의 공간 분석 요소 내에서 이미 예측되어 가시화 요소를 통해 제시된 바 있고 데이터베이스 요소에 자료로 보내어진 상태이다. 본 연구에서는 XY 평면 상에서 10m×10m의 격자 간격(연직 방향은 1m 격자 간격)으로 정보를 추출했으며, 동일 간격으로 지반 분석 요소 내에서 데이터베이스의 지층 및  $V_s$  정보를 토대로 부지 주기를 계산하여 다시 데이터베이스 요소에 자료로 할당하고 가시화의 기저 자료로 제공하였다.

## 2. 부지 주기의 지진 구역화를 통한 경주 지역의 지진 응답 평가

지역적 부지고유 지진 응답 특성 평가 및 그에 따른 지진 재해 예측 평가 목적으로 본 연구에서는 부지 주기를 의사 결정 지표로 도입하여 GIS 기법을 적용한 대상 지역 전체의

지반지진공학적 정보 구현 가시화를 수행하였다. GIS 기법 기반의 GTIS 구축을 통해 확장 예측된 공간 지층과  $V_s$  분포 정보를 토대로 대상 영역 내 평면 격자 위치별로 식 (2)에 따라 연산하였다. 경주 지역에 대한 부지 주기의 연산 결과를 공간 GIS 기법 내에서 그림 7과 같이 가시적으로 표출하여 부지고유 지진 응답에 관한 지표면 투영 정보의 구역화를 수행하였다. 구역화된 부지 주기 정보에 대한 상대적 공간 위치 확인을 위해 지표상 배치의 수계 및 건물 레이어들도 가시적으로 중첩 제시하였다. 그림 7의 부지 주기는 지역 내 임의 위치에서의 지진 재해를 정량적으로 예측 평가할 수 있는 지표이며, 이를 근거로 위치별 부지고유 지진 응답 특성의 차이를 판단할 수 있다.

부지 주기의 전반적인 위치별 값의 분포 경향은 기반암 상부 지층 두께가 부지 주기 산정의 주요 변수임에 따라 앞서 구축된 제시된 기반암 심도 분포(그림 6(b) 참조)와 대체로 유사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구 대상 경주 지역의 경우 대상 지역 내의 주변 산지를 제외한 주거 및 산업 시설이 밀집한 평야지에서 부지 주기는 약 0.2 초에서 0.5 초의 범위를 보인다. 따라서 층수에 따른 건물 고유 주기를 0.1 초로 고려해 볼 때 2층에서 5층 정도 건물의 지진시 공진 가능성 및 그에 따른 지진 취약성을 예측할 수 있다(Sun, 2004; Kim 등, 2002). 경주 시가지의 경우 현재 건물의 대부분이 단층 내지는 2층에서 5층으로 구성되어 있으므로 건물과 같은 구조물들의 내진 성능 평가 및 그에 따른 보강이 필요할 것으로 판단된다. 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. 경주 지역을 대상으로 본 연구에서 작성한 부지 주기

분포 정보는 무엇보다도 대상 지역 전체에 대한 부지고유 지진 응답 특성을 간편하게 종합적으로 예측 평가할 수 있으므로 도시 지역에 대한 지진 방재 시스템의 기본 정보로 활용될 수 있으며, 개발 구축된 지반-지식 기반 GTIS는 종합 방재 시스템의 기본 틀로 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 결 론

지반 정보의 종합적 활용을 통한 부지고유 지진 응답과 그에 따른 발생 가능 지진 재해의 지역적 평가 체계화의 일환으로, 역사적으로 큰 지진 피해가 발생했던 국내 내륙의 경주 지역을 대상으로 다양한 지반 조사 및 추가 지표 조사를 수행하였다. 획득한 지반 특성 결과를 기저 자료로 하여 기존의 일반적인 지반공학적 GIS와는 구분되는 차별적인 지반-지식 개념 기반의 GTIS의 구축 기법을 삼차원 GIS 기법의 적용을 통해 개발하였다.

GIS 기반의 GTIS 구축을 통해 다양한 지반 지진공학적 활용이 가능한 대상 경주 지역의 공간 지층 정보와 공간 전단파속도 정보를 제시하였다. 또한, 실무적 활용 목적의 지층 두께 정보 및 기반암 심도에 관한 지표 투영 형태의 삼차원 공간 분포 지도를 구축 제시하였다. 대상 경주 연구 영역 전체에 걸친 부지별 고유 지진 응답과 그에 따른 지진 재해의 예측 평가를 목적으로 부지 주기의 지표면 투영 정보 형태의 지진 구역화를 공간 GIS 기법의 적용을 통해 수행하였으며, 이로부터 대상 지역 전체에 대한 부지별 지진 응답 차이를 확인하였다. 구축된 부지 주기의 구역화 정보로부터 경주 지역의 주거 산업이 밀집된 도심 평야지의 부지 주기가 0.2 초에서 0.5 초의 범위가 지배적임을 확인하였고, 이에 따라 대상 영역 내 2 층에서 5 층 정도 건축 구조물의 지진 취약성을 직관적으로 파악할 수 있었다. 본 연구에서 GIS 기반으로 구축된 GTIS 토대

의 지진 응답 및 지진 재해 평가 기법은 도시 지역의 지진 방재 시스템 개발 및 구축에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 GIS 기반의 지역적 지진 재해 평가에 관한 시범 적용 연구는 향후 국내 주요 도시 지역들에 대한 지반 특성 자료 확보 및 GTIS 구축을 통해 국가적 지진 방재 대책 수립의 일환으로 확대 적용되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본 사업인 '실시간 지진 분석 및 지진재해 정량적 예측기술 개발'과제의 지원과 서울대학교 공학연구소의 연구 협조로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. **KAGIS**

## 참고 문헌

- 과학기술부. 2000. 지진세기의 정량적 평가 및 단층운동 해석 연구.
- 건설교통부. 2002. 국토건설종합지반정보 DB 구축 및 활용시스템 개발.
- 백동승. 2004. GIS를 이용한 도시방재시스템 구축방안 연구 -대구광역시 소방지리정보시스템을 중심으로-. 한국지리정보학회지 7(4):109-118.
- 선창국, 김보현, 정충기. 2006. 홍성 지역 화강 풍화 지층의 풍화도 및 전단파 속도에 관한 고찰. 대한토목학회논문집 26(6C):431-443.
- 선창국, 정충기. 2006. GIS를 이용한 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템 구축 기법의 개발 및 적용. 한국지반공학회논문집 22(2):55-68.
- 선창국, 정충기, 김동수. 2005. 국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계 제안. 한국지반공학회논문집 21(6):101-115.
- 유환희, 이민우, 이성민. 2002. 도시홍수재해 관리 시스템 구축. 대한토목학회논문집 22(3D):561-569.

- 정대영, 방희봉, 신영철. 2002. GIS를 이용한 재해상황 자동음성 통보시스템 구축. 한국지리정보학회지 5(1):69-79.
- 천성호, 선창국, 정충기. 2005. 지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용. 대한토목학회 논문집 25(2C):103-115.
- Durrani, A.J., A.S. Elnashai, Y.M.A. Hashash, S.J. Kim and A. Masud. 2005. The Kashmir Earthquake of October 8, 2005. A Quick Look Report, MAE Center Report No. 05-04, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Geodecisions. 2004. Geotechnical Data Management System. Assessment Report, State of Ohio, Department of Transportation, USA.
- Kim, D.S., C.K. Chung, C.G. Sun and E.S. Bang. 2002. Site assessment and evaluation of spatial earthquake ground motion of Kyeongju. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22(5):371-387.
- Kunapo, J., G.R. Dasari, K.K. Phoon and T.S. Tan. 2005. Development of a web-GIS based Geotechnical Information System. Journal of Computing in Civil Engineering ASCE 19(3):323-327.
- Lee, S. and U. Choi. 2003. Development of GIS-based geological hazard information system and its application for landslide analysis in Korea. Geosciences Journal 7(3):243-252.
- Rockaway, T.D. 1997. Spatial Assessment of Earthquake Induced Geotechnical Hazards. Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, USA.
- Scott, B.M. and L.H. Carlton. 1999. Applications and Issues of GIS as Tool for Civil Engineering Modeling. Journal of Computing in Civil Engineering ASCE 13(3):144-152.
- 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, Korea.
- Sun, C.G., S.H. Chun, T.G. Ha, C.K. Chung and D.S. Kim. 2008. Development and application of GIS-based tool for earthquake-induced hazard prediction. Computers and Geotechnics 35(3):436-449.
- Sun, C.G., D.S. Kim and C.K. Chung. 2005. Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea. Engineering Geology 81(4):446-469.
- Williams, T., P. Szary, T. Thomann, C. Konnerth and E. Nemeth. 2002. GIS Applications in Geotechnical Engineering. Final Report, FHWA 2002-06, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., USA. **KAGIS**