

# 홍성 지역의 공간 지층정보 예측을 통한 부지주기 토대의 지진공학적 부지분류

선창국<sup>1\*</sup>

## Seismic Site Classes According to Site Period by Predicting Spatial Geotechnical Layers in Hongseong

Chang-Guk SUN<sup>1\*</sup>

### 요 약

1978년 10월 7일 규모 5.0의 지진 발생으로 구조물 피해가 발생한 홍성 지역을 대상으로 지진 부지효과 관련 지진 지반운동을 평가하기 위하여 지질 및 지반 조건에 관한 지반 특성을 평가하였다. 현장에서는 16 개소의 부지에 대해 시추조사와 전단파속도 분포를 획득하기 위한 탄성과 시험의 다양한 지반 조사를 수행하였다. 홍성 및 인근에서의 지반 조사와 추가 수집을 통해 확보한 지반 자료를 토대로, 지반 정보 관련 전문가 시스템을 공간 GIS 기법을 적용하여 구축하였다. 소도시 지역의 지진운동 평가 목적의 GIS 기반 지반정보 시스템의 실질적 활용을 위하여, 기반암 심도 및 부지 주기와 같은 지반 특성 변수의 공간 지진재해 구역화 지도를 홍성을 행정 영역 전체에 걸쳐 작성하고 지진 취약도의 공간 분포를 확인하였다. 부지 주기 기반의 부지 분류 체계를 적용하여 내진설계 시 부지 증폭계수를 결정할 수 있는 공간 구역화를 수행하였다. 홍성 지역의 지진재해 구역화 연구로부터 지반 조사 기반의 GIS가 내륙 소도시의 지진 지반운동의 지역적 예측에 매우 유용함을 확인하였다.

주요어 : 지층, 부지주기, 부지분류, 내진설계, 공간구역화, 부지효과

### ABSTRACT

Site characterization on geological and geotechnical conditions was performed for evaluating the earthquake ground motions associated with seismic site effects at a small urbanized area, Hongseong, where structural damages were recorded by an earthquake

2010년 8월 12일 접수 Received on August 12, 2010 / 2010년 10월 22일 수정 Revised on October 22, 2010 / 2010년 10월 29일 심사완료 Accepted on October 29, 2010

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

\* 연락처 E-mail : pungsun@kigam.re.kr

of magnitude 5.0 on October 7, 1978. In the field, various geotechnical site investigations composed of borehole drillings and seismic tests for obtaining shear wave velocity profile were carried out at 16 sites. Based on the geotechnical data from site investigation and additional collection in and near Hongseong, an expert system on geotechnical information was implemented with the spatial framework of GIS. For practical application of the GIS-based geotechnical information system to assess the earthquake motions in a small urban area, spatial seismic zoning maps on geotechnical parameters, such as the bedrock depth and the site period ( $T_G$ ), were created over the entire administrative district of Hongseong town, and the spatial distributions of seismic vulnerability potentials were intuitively examined. Spatial zonation was also performed to determine site coefficients for seismic design by adopting a site classification system based on  $T_G$ . A case study of seismic zonation in the Hongseong area verified that the GIS-based site investigation was very useful for regional prediction of earthquake ground motions in a small urbanized inland area.

**KEYWORDS** : *Geotechnical Layers, Site Period, Site Classification, Seismic Design, Spatial Zonation, Site Effects*

## 서론

최근 해외의 대규모 지진 발생 및 그에 따른 주거 산업 밀집 지역들에서의 지진재해 상황을 고려해 볼 때(Lin and Chai, 2008; Poland, 2010), 시공간적으로 불확실한 모호성을 보이는 지진에 대해 지역적 고유의 지반 지진 민감도를 합리적으로 반영한 체계적 지진재해 대책 수립 적용이 국가적 측면에서 필요하다. 국가나 지역의 지진재해 대책 수립 과정에서 우선 중요하게 고려해야 하는 항목이 바로 대상 영역 내에서의 지진 지반운동(earthquake ground motion)의 결정이다(Sun *et al.*, 2005). 지반운동은 특정 시설물 부지에 국한하여 국부적 평가나 넓은 영역에 대한 지역적 평가가 이루어 질 수 있다(선창국과 정충기, 2008). 전자의 경우 주로 대상 부지에 대한 철저한 지반 조사를 수행하고 이를 토대로 부지고유 지진 응답 해석이라는 수치 해석을 실시하여 지진 지반운동을 평가하는 방법이 주류를 이룬다(Dobry *et al.*, 2000). 후자의 경우 전자와 같은 평가 결과

및 실제 지진 계측 결과를 종합적으로 분석하고 이를 토대로 지역적 예측 지반 특성 지표와 지진 지반운동과의 경험적 관계를 이용하여 지반운동을 결정하는 기법을 의미한다(Field *et al.*, 2000). 평가의 신뢰도 및 정밀도 측면에서는 일반적으로 국부적 기법이 높을 수 있으나 대상이 영역적으로 매우 제한된 부지가 되므로, 국가나 지역을 대상으로 하는 넓은 평면 영역에 대한 지진 지반운동 평가를 위해서는 대개 지역적 평가 기법으로서의 경험적 관계가 활용된다(Sun *et al.*, 2008).

지진 지반운동의 크기나 주파수(주기) 분포와 같은 특성은 해당 부지의 지반 특성에 따라 매우 다르게 나타난다. 지진 시 기반암(bedrock)에 도달한 지진동은 그 상부의 토사층을 통과하면서 부지별 고유의 지질 조건 및 지반 동적 특성과 관련된 부지효과(site effects)에 따라 특정 주기 부근에서 증폭(amplification) 또는 감폭(deamplification)되어 지표면의 지진 지반운동으로 표출된다(Sun *et al.*, 2005). 공학적 견지의 시설물 내진설계나 내진성능평가 시에 적용되는 부지 지반 특성에 따른 경험적 지반운동 결정 방법

이 바로 부지 분류 체계이며(Dobry *et al.*, 2000), 이 부지 분류 체계를 토대로 부지고유 지진응답 평가가 가능하다(Ghasemi *et al.*, 2009). 부지 분류 체계 내에는 지반 특성의 정량적 지표로서의 부지 분류 기준이 포함되어 있으며, 부지 종류 별로 서로 다른 지반 운동으로 결정된다.

광범위한 지역에 대한 지반 특성의 합리적 예측은 일차원적인 지반 조사 자료의 산발적 이용만으로는 불가능하며(선창국과 정충기, 2008), 지리정보시스템(GIS)과 같이 체계적 통합 DB 관리 및 공간 처리의 복합적 기능 수행이 가능한 정보 기술의 활용이 반드시 필요하다(Kunapo *et al.*, 2005). 본 연구에서는 지역적 지진재해 대응 체계 수립을 위한 근본적 정보 제공 기법 확립의 일환으로, GIS 기법과 지진공학 전문가 지식의 복합 적용을 통해 1978년 지진이 발생한 소규모 내륙 도시인 홍성읍 영역 대상의 지진위험도 정보를 구축 제시하였다.

### 기존의 GIS 기반 부지 지진 응답 평가 사례 고찰

GIS를 이용한 부지효과로서의 부지고유 지진 응답의 평가에 관한 기존 연구 성과는 대상 평면(또는 지표면) 영역에 지진공학적 전문가 기법을 통해 결정된 등수준의 지진 응답 정도를 구분하여 표출하는 지진(재해) 구역화(seismic zonation)의 최종 형태로 제시되어 왔다(Sun *et al.*, 2008). 국내 보다는 강진 발생 국가를 포함한 해외에서 주로 수행되어 온 지진 구역화는 국내의 경우 최근 극히 제한적으로 진행되기 시작했다(Sun, 2004). 해외의 경우 주로 미국 서부의 강진 발생 지역들에 대해 지진 방재 체계의 기저 활용을 위한 지진 구역화 정보가 제시되어 왔다. San Francisco 만 주변과 Los Angeles 주변 지역이 대표적인 지진 구역화 대상이다(ABAG, 1995; Sun, 2004). 이 지역들에서의 대상 정보는 매우 넓은 영역에 대한 지진 발생시 지

표면 부근 진동의 증폭 크기에 관한 평면적 분포로서, 현행 국내외 부지 분류 기준인 지표면부터 지하 30m까지의 평균 전단파속도( $V_{s30}$ )와 같은 증폭 관련 지반지진공학 지표의 분포를 이용하였다(Field *et al.*, 2000).

기존 주요 대상이었던 강진 발생 지역과는 달리 우리나라는 중약진 지역으로 구분될 수 있다(Sun *et al.*, 2005). 그렇다 할지라도 시공간적 불확실성 내재의 지진에 대한 체계적 대책 수립은 반드시 필요하며, 유럽의 주요 국가들 역시 비교적 지진 발생 및 그에 따른 피해 가능성이 낮음에도 불구하고 주요 지역에 대한 지진 구역화 연구를 진행하고 있다. 유럽 중약진 지역의 경우 대표적 GIS 기반 부지효과 평가는 스페인 Barcelona와 스위스 Basel 지역을 대상으로 수행되었다(Jimenez *et al.*, 2000; Fah *et al.*, 2001). 유럽 내의 강진 지역에서는 이탈리아의 Celano 및 그리스의 Thessaloniki에 대해 지진 구역화가 이루어 졌다(Apostolidis *et al.*, 2004; Martinelli *et al.*, 2008). 이러한 유럽 도시 지역들의 경우 지반 증폭 정도 평가에 관한 신뢰도를 높이기 위해 추가적 부지 조사와 평가 기법 보완을 실시하여 초기 정보를 갱신하고 있다.

이와 같은 기존 해외의 지진 구역화 정보 연구 사례들은 대부분 이차원 기반의 정보 제시로 한정되어 왔다. 뿐만 아니라 체계적이고 신뢰성 높은 지층 정보 예측 기법의 적용 없이 지표면 부근 지질 분포 자료나 제한된 공간 분포의 기존 시추 조사 자료를 토대로 대상 지역 전체의 지반 특성을 단순 예측하고, 이를 토대로 GIS를 이용한 부지고유 지진 응답 평가를 수행해 왔다. 기존의 이러한 지진 구역화 연구와는 달리 본 연구에서는 현실성을 부여한 삼차원 GIS 기법 기반의 정보 시스템을 구축하고자 하였다. 더불어 대상 지역 부지들에 대한 종합적인 지반 특성 조사 수행 및 이 특성 자료를 토대로 전체 영역으로의 공간 지층의 효율적 예측 기법을 도입 적용하여(선창국과 정충기, 2008), 지반정보 시스템

(geotechnical information system)을 구축하고 부지 분류 체계의 적용을 통한 부지고유 지진 응답의 합리적 평가를 도모하였다.

### 지반운동 결정을 위한 부지 주기 토대의 부지 분류 체계

지진 발생시 지표면 부근 지반운동은 국부적 부지효과에 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(선창국 등, 2008). 부지별 고유의 지진 응답 특성은 일반적으로 부지 주기(site period,  $T_G$ )로 대표되며(Sun *et al.*, 2008), 부지고유 지진 응답 특성이 반영된 지반 운동은 구조물의 고유 주기 특성에 따라 공진 현상을 발생시킬 수 있다. 이러한 지진공학적인 현상적 특성에 따라 지반 특성 고려한 부지 주기의 지역적 예측을 통해 부지고유 지진 응답을 간편할 뿐만 아니라 비교적 신뢰성 높게 평가한다. 또한, 그에 따른 해당 부지에서의 구조물의 취약도와 같은 지진 재해를 평가할 수 있다(Kienzle *et al.*, 2006).

부지 주기는 지하 암반(기반암) 상부에 분포하는 여러 토사 지층 전체의 기본 공진 주파수에 해당되는 주기이다(선창국과 정충기, 2008). 따라서 부지 주기는 토사 지층 전체의 두께인 기반암 심도(bedrock depth,  $H$ )와 직접 관련이 있고 각 토사 지층의 동적 특성에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 실제 동적 특성이 다른 여러 토사 지층으로 구성된 현장 원위치에 대한 부지 주기는 각 토사 지층 두께와 지층의 동적 특성이자 강성인 전단파속도(shear wave velocity,  $V_S$ )를 이용하여 산정하게 된다. 식 (1)은 부지 주기(단위는 초(s))의 계산식이며,  $D_i$ 와  $V_{Si}$ 는 각각 기반암 심도( $H$ )까지의  $i$ 번째 지층의 두께( $H = \sum D_i$ )

와 평균 전단파속도이다.

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

부지 주기의 지역적 예측 평가는 대상 지역에 위치한 구조물의 지진 취약도 예측에 직접 적용 가능하다. 뿐만 아니라, 국내외의 여러 연구 성과(Rodriguez-Marek *et al.*, 2001; Sun, 2004; Kim and Yoon, 2006; 선창국, 2010)로 제시되고 있는 부지 주기 기반의 부지 분류 체계를 이용하여 부지 증폭계수 결정과 이로부터의 지진 지반운동 결정에도 활용될 수 있다. 특히, 선창국(2010)은 국내 지역고유의 지진응답 특성을 보다 체계적으로 반영할 목적으로, 다양한 부지 조건에 대한 지진 응답 해석을 수행하였으며, 그 결과를 분석하여 국내 부지 증폭계수(site coefficients)를 재산정하고 부지 주기를 기준으로 적용할 수 있는 부지 분류 체계를 표 1과 같이 제시하였다. 또한, 선창국(2010)은 현행 미국 및 국내의 부지 분류 C와 D(건설교통부, 1997; 선창국 등, 2005b)에 대해 국내 일반적 부지가 이 두 분류의 경계 부근에 밀집되어 있음을 파악하고 이 두 분류를 각각 4 단계로 세분함으로써 국내 지반에 대한 체계적 보완을 병행하였다. 본 연구에서는 기존 분류 체계(건설교통부, 1997)와는 달리 지하 지층의 기하학적 조건을 이용하는 국내 부지 분류 체계인 표 1을 도입하고 대상 지역에 대한 부지 분류 정보를 GIS 기법을 적용하여 구축 제시하였다. 이로부터 대상 내 모든 부지의 내진설계나 내진성능평가를 위한 지진 지반운동을 결정할 수 있는데, 부지 분류 체계를 통한 부지 효과 평가는 부지 주기를 이용하여 대상 위치의 분류를 수행하고 그에 따른 단주기 증폭계수( $F_a$ ) 및 중장주기 증폭계수( $F_b$ )를 결정함으로써 이루어진다.

TABLE 1. 국내 부지 증폭계수 결정을 위한 부지 주기에 따른 부지 분류 체계(선창국, 2010)

부지 조건	부지 분류	분류 기준, $T_G$ (s)	부지 증폭계수		
			$F_a$	$F_v$	
보통암	B	< 0.06	1.00	1.00	
풍화암 또는 매우 견고한 토사	C	C1	< 0.10	1.28	1.04
		C2	< 0.14	1.45	1.09
		C3	< 0.20	1.65	1.13
		C4	< 0.29	1.90	1.19
견고한 토사	D	D1	< 0.38	2.08	1.23
		D2	< 0.46	2.26	1.29
		D3	< 0.54	2.48	1.36
		D4	< 0.62	2.86	1.43
깊고 연약한 토사	E	$\geq 0.62$	1.50	2.00	

## 홍성 지역의 GIS 기반 지반정보 시스템 구축

최근 도시 지역을 대상으로 지반 자료의 종합 관리와 더불어 지진, 홍수 등의 재해 대책 수립을 위한 기본 방안으로 국내외에서 광범위하게 지반 정보 GIS가 개발·구축되고 있다(Lee and Choi, 2003; Sun, 2004; 장용구 등, 2007). 지반 정보는 그 의미와 내용이 매우 다양하며, 그 중에서도 지반 특성을 파악하기 위해 근본적으로 활용되는 가장 중요한 정보는 지층이다(Sun *et al.*, 2008). 본 연구에서는 국내 내륙의 지진피해 발생 소도시 지역에 대해 내진공학 측면의 부지 분류 정보를 도출하고자 체계적인 지반 조사를 수행하고 특성 자료를 확보하고 기존의 지반공학 정보 시스템 기법과 GIS 기능들을 복합 도입 적용하여 공간 지층 정보를 합리적으로 예측하였다.

### 1. 지반정보 시스템 구축을 위한 GIS 환경 및 전문가 지식 기법

지반공학적 범용 활용 목적의 지반정보 시스템의 구현을 위해서는 공간상에 분포하는 지반 특성 정보의 효율적 관리와 공간 기지

자료 토대의 미지 자료에 대한 신뢰성 높은 예측이 가능해야 하고 다양한 형태의 가시적 및 수치적 출력이 가능해야 한다. 이와 같은 복합적 기능의 달성을 위해서는 여러 전문가적 GIS 소프트웨어의 상호 보완적 활용과 더불어 GIS와 연계된 전문가적 분석 기법의 병용이 요구된다(Gangopadhyay *et al.*, 1999; Sun, 2004). 본 연구에서는 지반정보 시스템 구축을 위하여 전문가적 GIS 소프트웨어로서 미국 CTech 개발사의 EVS-Pro(CTech, 2008)와 미국 Autodesk 사의 AutoCAD 제품군(Autodesk, 2007)을 이용하였으며, 그 외에도 활용적 및 보완적 기능으로서 범용 편집 프로그램을 활용하거나 자료의 공간적 보간 예측 연산을 위한 Visual BASIC 코드 기반의 프로그램을 개발하여 이용하였다.

도시 지역에서는 주거나 산업 시설이 밀집한 평지나 매립지에 대해서 기존 지반 조사 자료가 산지에 비해 상대적으로 많이 분포하게 되므로, 제한적 자료를 이용한 주변 부지의 합리적 지층 정보 예측을 위해서는 자료가 부족한 산지나 시설물 부재 지역들에 대한 추가적 자료 확보가 필요하다. 더불어, 미지 정보의 예측이 필요한 상황에서 자료간 내삽이 자료의 외삽에 비해 신뢰도가 높으므로, 관심 대상 영역 보다 더 넓은 영역의 자료를 확보

하여 공간 확장 예측을 수행하고 그로부터 대상 영역의 정보를 추출하는 방안 적용이 합리적이다(선창국과 정충기, 2006; Sun *et al.*, 2008). 이러한 개념들을 지반-지식(geo-knowledge) 및 확장 영역(extended area)이라고 정의하며(선창국과 정충기, 2006), 본 연구 과정에서 적용하였다. 확장 영역은 대상 연구 영역(study area)를 평면 상에서 포함하는 영역이다. 지반-지식 개념에 근거한 지표면 부근 지층 자료의 추가 획득 목적의 현장 부지 지표 조사(site visit)는 확장 영역에 걸쳐 주로 산지나 자료 부족 지역들을 대상으로 수행된다(Sun *et al.*, 2008).

지반정보 시스템은 삼차원 GIS 기법을 근간으로 하며, 데이터베이스(database), 공간 분석(spatial analysis) 및 가시화(visualization)의 세 구성 요소로 이루어진다. 이 중 데이터베이스 요소 내에는 확보되거나 수행된 지반조사 자료 그리고 대상 지역의 층서학적 특성을 고려한 지형 분석 및 현장 답사로부터 추

가 확보한 지표 지층 자료로 구성되는 지반-지식 자료가 포함된다. 공간 분석 요소에서는 지층 발달(landform) 특성별 베리오그램(variogram) 모델을 차별적으로 적용하는 개선된 지구통계학적 크리깅(geostatistical kriging) 기법으로 지층 두께 자료의 공간 영역에 대한 예측을 수행하여(Jian *et al.*, 1996; 천성호 등, 2005), 광범위한 영역에 대한 지반 지층의 공간 정보화 시스템의 신뢰성을 증대시켰다(천성호 등, 2005; 선창국과 정충기, 2006). 본 연구에서는 그림 1에 제시한 지반정보 시스템 전체 구성과 같이 일반적인 GIS 구성과 연계하여 지반지진공학적 자료 생성을 위한 전문가적 연산 목적의 지반 분석(geotechnical analysis) 요소를 추가 구성하였다. 지층 두께 연산 및 이를 통한 기반암 심도 연산을 수행하며, 연산된 지층별 두께와 지반 동적 특성인 전단파속도( $V_s$ )를 종합 활용하여 부지 주기( $T_c$ )를 산정한다.

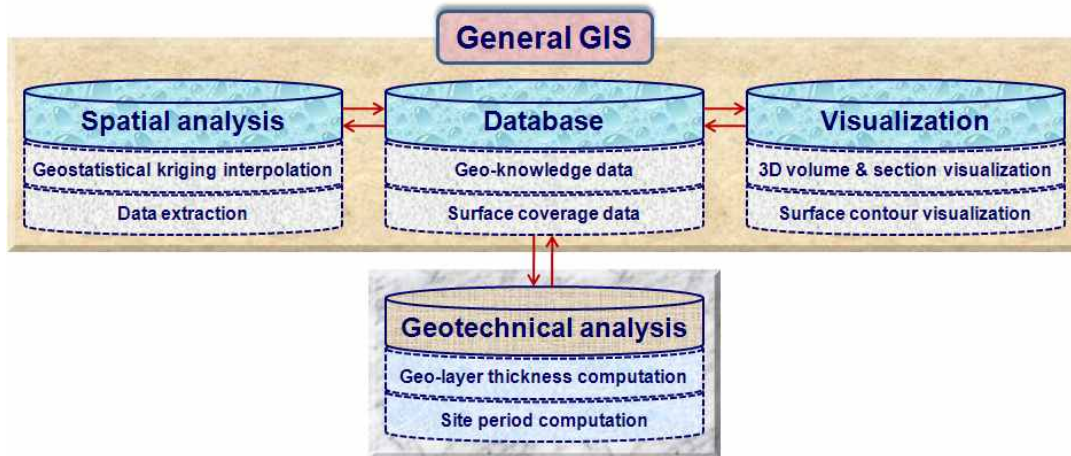


FIGURE 1. GIS 기반의 지반정보 시스템 구성

**2. 대상 소도시 홍성읍에 대한 지반조사 및 추가 자료 확보**

홍성읍 지역은 북위 36.60도, 동경 126.67도 정도에 위치한 우리나라의 전형적인 지방

소도시 지역으로서, 1978년 10월 7일 발생한 규모 5.0의 지진에 의해 실제 부지에서 구조물 피해 사례들이 발생했던 대표적 계기지진 피해 지역이다(과학기술처, 1979). 역사 문헌

들 내에서도 여러 번 지진으로 인한 피해가 발생했던 역사지진 피해 지역이기도 하다 (Sun *et al.*, 2005). 이와 같은 계기 및 역사 지진 피해 발생 지역으로서의 중요성을 고려하여, 본 연구에서는 홍성읍 지역을 GIS 적용 기반의 지진공학적 부지응답 특성 평가를 위한 시범 영역으로 선정하고, 대상 지역의 부지 특성 평가와 자료 확보를 위해 다양한 지반조사를 수행하였다. 또한, 기존 지반조사 자료를 수집함과 더불어 자료 분포 현황을 고려한 현장 답사를 통해 지표 지층 자료를 추가 확보하였다.

지반조사 위치는 지질 및 지형 자료를 분석하고 고찰하여 대상 연구 영역인 읍 경계 내에서 산지 3 개소, 구릉 6 개소 그리고 평야 7 개소의 총 16 개소로 결정하였다(선창국 등, 2006). 이 중 6 개소에서는 표준관입시험 (standard penetration test, SPT)이 병행된 시추조사와 시추공 탄성과 시험(borehole seismic test)을 수행하였다. 표면파를 이용한 탄성과 기법인 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 시험은 1 개소를 제외한 15 개소에서 실시하였다. 이러한 지반조사를 통해 홍성 지역의 일반적 지반지층 발달 현황을 파악하고 동적 특성인  $V_s$  분포를 결정하였다.

행정 구역상의 홍성읍 경계 내부 영역을 연구 영역으로 선정하고 이를 포괄하는 확장 영역을 동서와 남북 방향 각각 8.0 km로 설정하였다. 확장 영역에 대해 본 연구에서는 우선 웹기반 지반 자료 제공 서비스인 지반정보통합 DB 시스템(GeoInfo 지반정보, 2009)으로부터 기존 시추조사 자료를 수집 및 검토 보완하여 활용 가능 자료를 선별하였다. 뿐만 아니라, 현장 방문을 통해 확장 영역 내의 구조물 지반조사 자료를 확보하였다. 전체적으로 약 100 여 개소의 위치에 대한 자료를 깊이에 따른 지층변화 분포에 관한 적용 자료로 확보하였다. 또한, 수행 및 수집된 지반조사 자료의 위치 분포를 분석하고 자료 부족 위치들을 대상으로 지표 지층 자료 획득을 위한 현장 방문

조사를 진행하였다. 본 연구에서는 지반지진공학 적 관점의 기존 지층 구분 방안(선창국 등, 2005a; Sun and Chung, 2008)을 반영하고 실무적 보편성을 고려하여 조사 확보된 지층을 매립토(fill), 퇴적토(alluvial soil), 풍화토(weathered soil), 풍화암(weathered rock), 그리고 기반암(bedrock)의 총 5 종류로 구분하였다.

이러한 과정을 통해 수집 확보된 자료는 수행된 지반조사 자료와 함께 데이터베이스로 구축되었으며, 위치 분포는 그림 2의 공간 GIS 적용을 통한 가시화에서 확인할 수 있다. 지표 지형은 반투명 표출 기능을 적용하고 위치의 상대적 참고를 위해 확장 영역에서의 하천 수계 레이어(layer) 중첩 가시화하였는데, 이 연구의 결과 표출 그림들의 경우 도로나 건물 레이어를 선별적으로 중첩하였다. 더불어, 연구 영역에 해당되는 홍성읍 행정 경계를 확인할 수 있다. 그림 2에서 본 연구를 위해 직접 실시된 SPT 병행의 시추조사 부지 6 곳의 위치(부지명은 H1부터 H6)를 강조하여 제시하였는데, 시추공 탄성과 시험(borehole seismic test) 수행 부지들에 해당된다. 이 주요 6 개소 부지들에서 결정된 전단파속도 ( $V_s$ ) 분포들과 각 부지별 지층 구성 및 SPT의  $N$  값 분포는 그림 3에 제시하였으며,  $N$  값이 50을 넘는 경우는 모두 50으로 나타내었다(Oh and Sun, 2008). 더불어, 그림 2에서 도심부의 주요 조사 자료 부지를 연결하는 대표 단면선을 설정하여 세부적인 지하 지층 분포를 그림 4와 같이 확인하였다. 기반암 심도가 급격하게 변화하는 경향도 일부 확인되었으나, 대체로 도심 내부의 경우 30 m에서 40 m정도 기반암 심도를 보였고 일부 부지에서는 40 m 이상으로도 조사되었다. 본 연구의 가시적 표출은 TM 투영 평면 좌표계 기반의 미터(m) 단위로 구성하였으며, 연직 방향은 가시적 강조를 위해 3 배 과장하였다. 동서 및 남북 방향은 각각 X 및 Y 축에 해당되고, 연직 표고 방향은 Z 축에 해당된다.

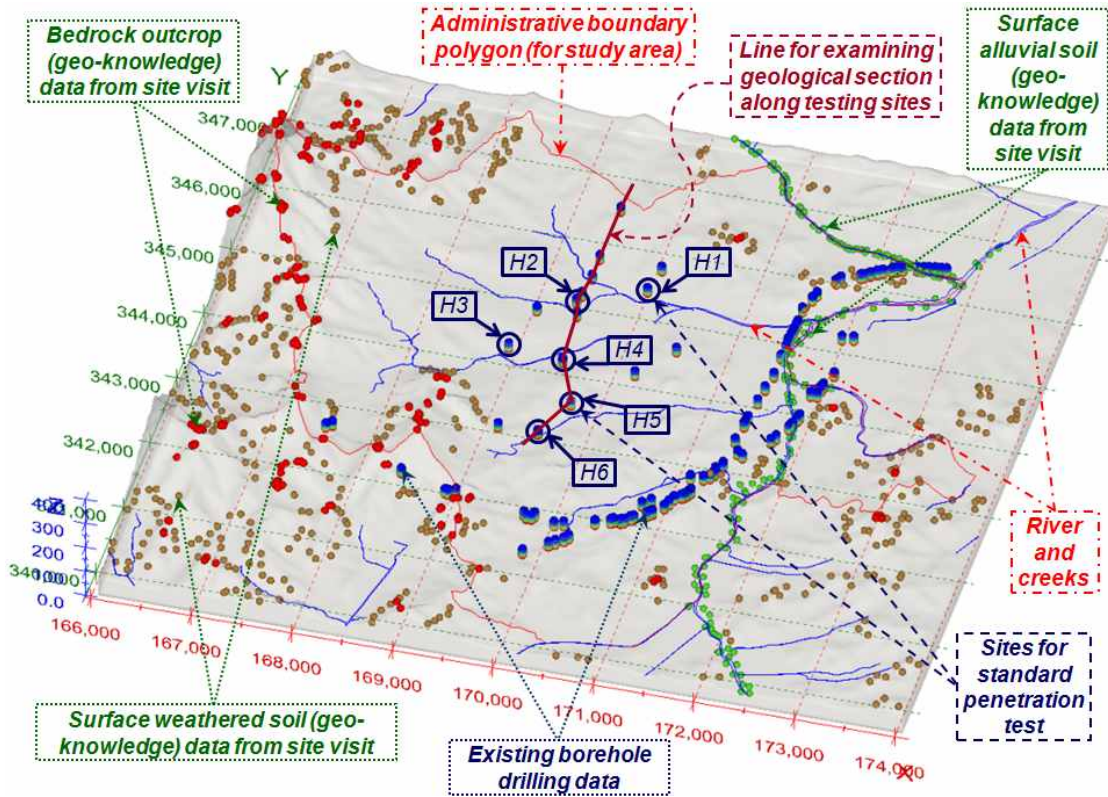


FIGURE 2. 홍성 확장 영역(8.0 km × 8.0 km)에서의 지반 자료 위치 분포

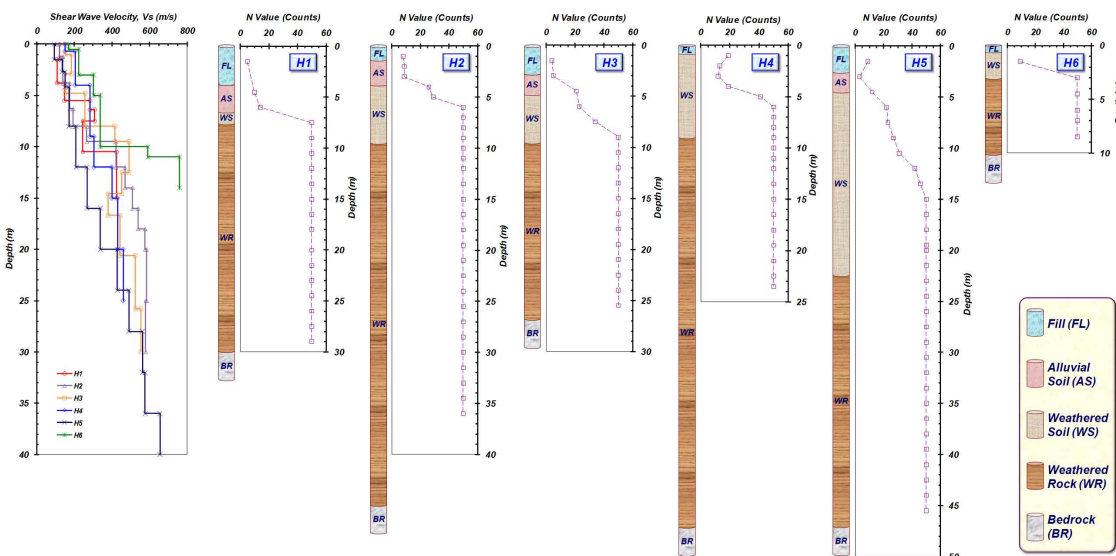


FIGURE 3. 홍성 도심 시추공 탄성과 시험 부지들의 시험 및 조사 결과



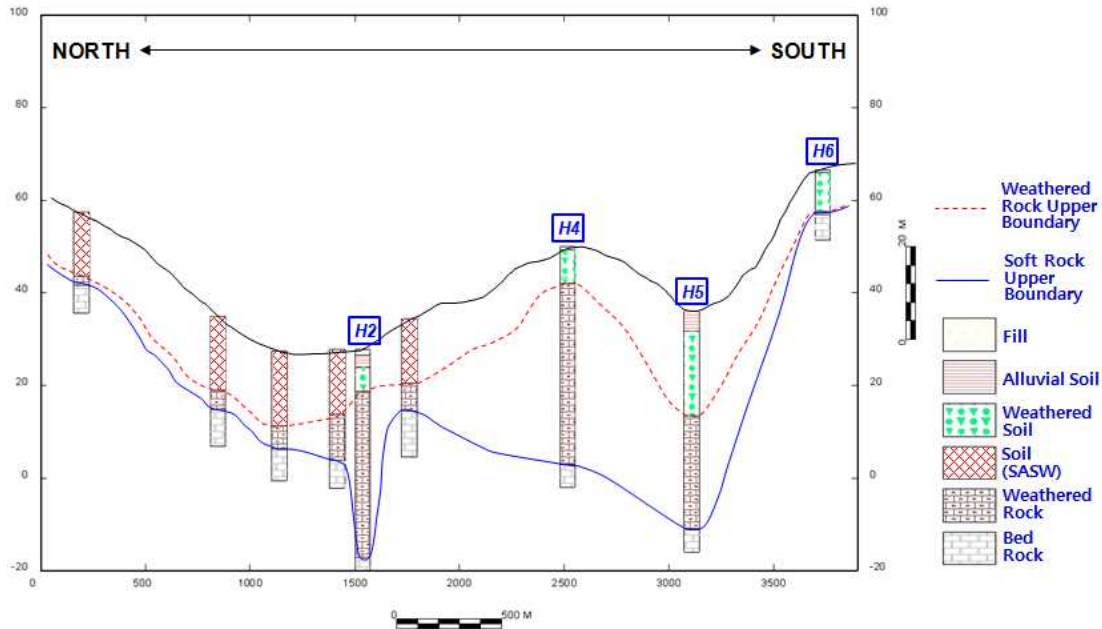


FIGURE 4. 홍성 도심 주요조사부지 연계 단면의 지층 구성 확인

### 3. 지반정보 시스템 구축을 통한 홍성 지역의 공간 지층 정보

홍성의 확장 영역에 대해 구축된 지반 DB의 지층 자료를 토대로 확장 영역 전체의 공간 지층 정보를 보간 예측하여 연구 영역의 종합적 지반 정보 구현을 위한 기초적 정보 시스템을 구축하였다. 홍성 지역에 대한 공간 지층 정보는 분류된 5 종류 지층으로 구분하여 보간 예측하였다. 평면상의 직사각형인 확장 영역을 대상으로 크리깅 보간된 지층 정보로부터 그보다 작고 복잡한 폐합 형상인 연구 영역의 지층 정보를 추출하여 공간 확장 예측된 지층 정보의 신뢰성을 향상 시킬 수 있다. 그림 5는 보간 예측된 확장 영역 전체의 공간 지층 정보로부터 홍성읍에 해당되는 연구 영역 정보를 추출하는 과정을 개념적으로 가시화한 지반정보 시스템 구축 결과이다. 연구 영역 공간 지층 정보의 지표면에는 하천, 도로 및 건물을 중첩 제시하였다.

본 연구의 적용 기법과 같은 일부 지반 및

지질 전문가 GIS 소프트웨어들에서는 삼차원 지반에서 임의 단면 지층 분포의 확인 기능들을 제공한다(Sun *et al.*, 2008). 그림 6은 GIS 기반의 공간 지반정보 시스템에서 대상 홍성 연구 영역에 대해 지표지형 변화 확인을 위한 위성영상의 중첩 구현(좌측 그림)과 삼차원 지층 단면 분포 확인을 위한 가시적 기능 구현(우측 삽입 그림들)의 연속적 표출 결과이다. 위성영상 중첩의 지역적 지형을 파악해 보면 홍성은 대체로 노년기 지형에 해당된다. 지표면 중첩 영상에 표시된 W-E 및 S-N 직선은 대상 영역의 일반적 지층 단면을 확인하기 위해 삽입된 단면 기준선으로서, 지표면 지형 변화에 따른 홍성 지역의 지하 지층 구성 변화를 알아보기 위한 것이다. 대표 기준선들을 따라 공간 지층의 단면 절단을 통해 지형 변화에 따른 연직 방향 지층 변화를 그림 6의 우측 삽입 그림들에서 확인할 수 있다. 대체로 평지와 구릉지에서 퇴적토 보다는 풍화토와 풍화암으로 구성된 풍화지층(weathered layer)이 두껍

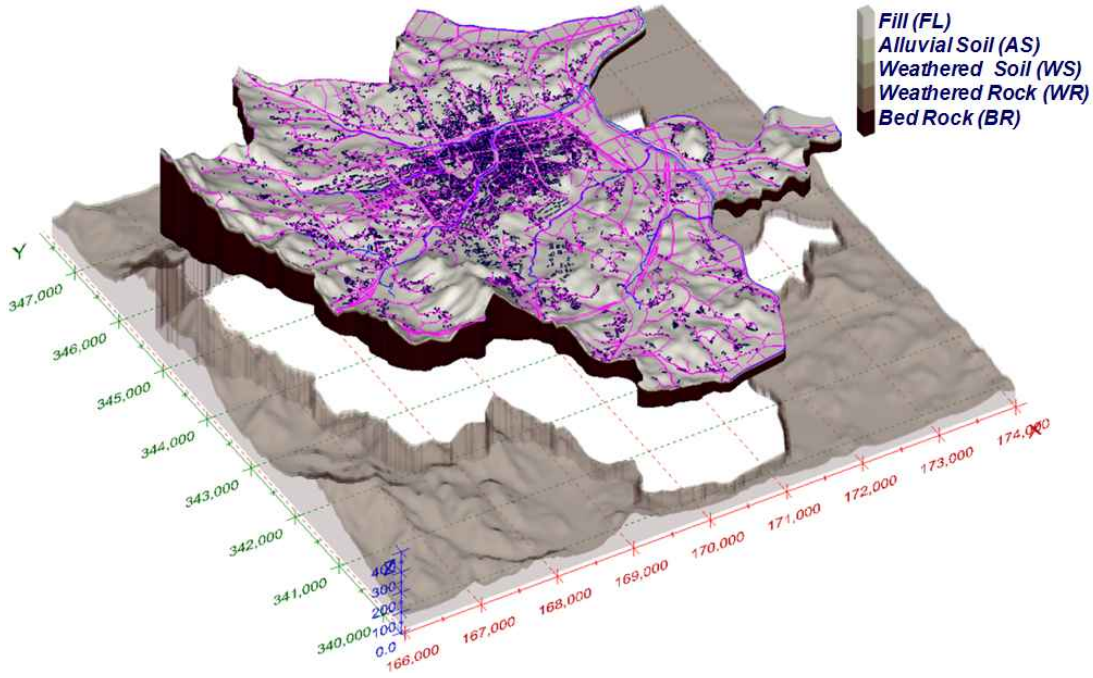


FIGURE 5. 홍성의 확장 영역으로부터 연구 영역(홍성읍) 공간 지층 정보 추출

게 발달하여 분포하고 있다. 특히, 이러한 경향은 국내 중서부 지역 노년기 지형의 안정적 풍화 환경 하에서의 지층 발달 특성에 해당된다

(이금삼과 조화룡, 2000; 선창국 등, 2006).

홍성읍 지역에 대한 지반정보 시스템의 대표적 결과인 삼차원 공간 지층 정보는 GIS

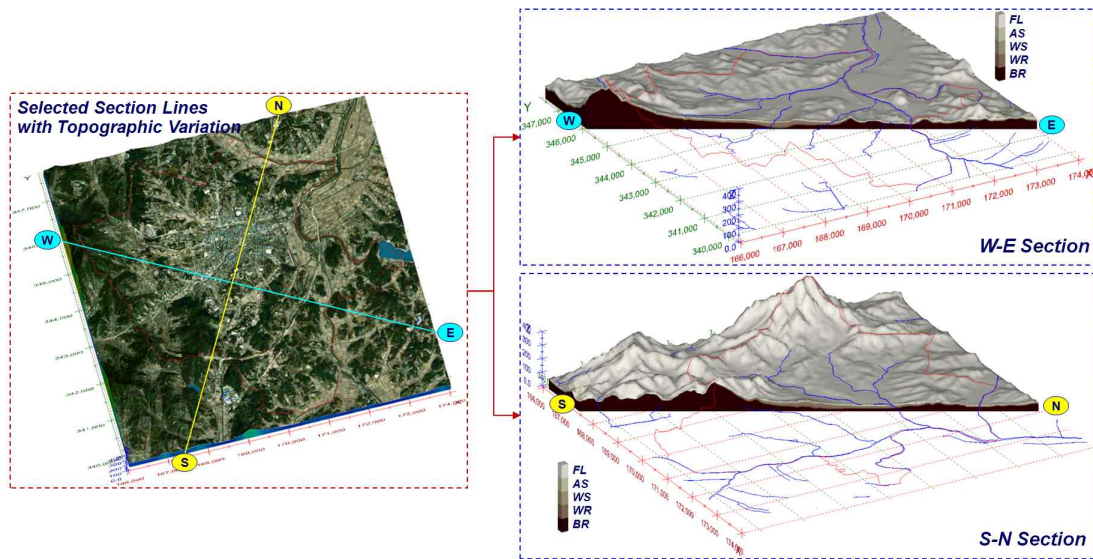
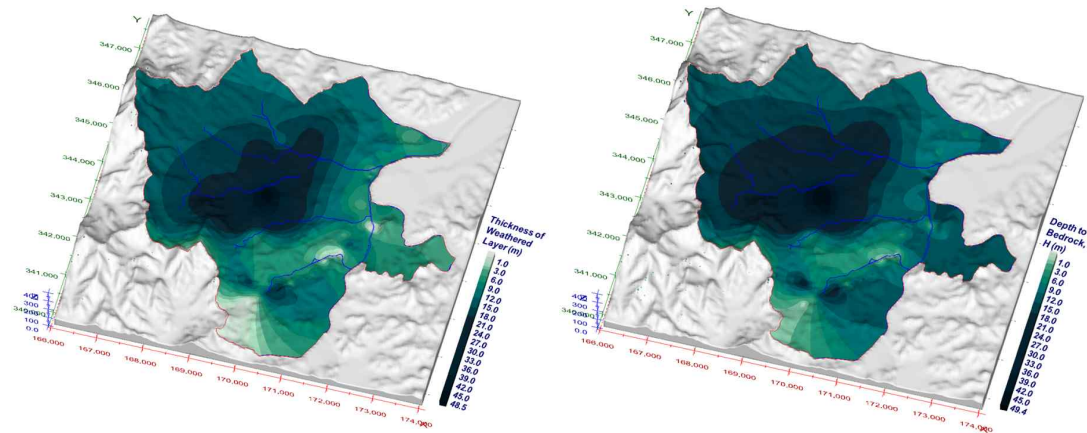


FIGURE 6. 홍성 지역 대표 단면들의 지형 변화에 따른 지하 지층 분포 확인

환경 내에서는 가상적 현실성(virtual reality) 및 가시성이 뛰어날 수 있으나, 현업이나 실무의 활용성에 있어서는 제한적일 수 있다(Sun, 2004). 이러한 실무적 접근성의 단점을 보완하고 공간적 가시성도 손상시키지 않기 위하여 삼차원 공간 지반 지층 정보를 재가공하여 지층의 두께 및 심도에 관한 특성 정보를 지표면 투영의 가시적 구역화(zonation) 지도로 GIS의 일반적 기능 적용을 통해 구현하였다. 본 연구에서의 대상 정보는 각 지층의 두께, 인접 지층의 조합 두께 그리고 각 지층까지의 심도를 포함한 기반암 심도이다.

가능한 여러 대상 중 대표적인 정보로서의 풍화대 두께와 기반암 심도( $H$ ) 분포를 가시적으로 구현한 삼차원 지도를 그림 7로 제시하였다. 상대적 위치 파악을 위해 지표 배치

의 수계 레이어드 중첩 표현하였다. 풍화토와 풍화암의 종합인 풍화지층의 두께 분포(그림 7(a))에서 확인할 수 있는 바와 같이, 평지와 완만한 구릉지에서 오랫동안의 안정적 풍화 발달 환경(선창국 등, 2006)으로 인해 풍화지층이 최대 40 m를 초과하는 두꺼운 분포로 존재하고 있다. 이와 같은 지도 자료는 지반공학 관련 문제 해결 및 의사 결정에 직관적 정보를 제공할 수 있다. 또한, 지반공학 뿐만 아니라 지진공학 측면에서도 매우 중요한 매개 변수(Sun *et al.*, 2008)로 인지되고 있는 기반암 심도 분포(그림 7(b))의 경우, 홍성 지역의 기반암 상부 토사 지층의 발달이 주로 풍화에 의해 이루어짐에 따라 전반적인 분포 경향은 풍화지층 두께(그림 7(a))와 유사하게 나타나고 있다.



(a) 풍화지층 두께 분포

(b) 기반암 심도 분포

FIGURE 7. 홍성읍 영역의 대표적 지층 분포에 관한 공간 구역화 정보

홍성읍 행정 영역으로 구성되는 대상 연구 영역에서 기반암 심도는 평지와 구릉지가 접하는 양상의 중심 지역에서 최대 약 50 m 정도 깊이까지 예측되었다. 주변 산지에서는 얇은 토사층 분포로 인해 기반암 심도가 얕고 상대적으로 북쪽과 서쪽에 비해 남쪽과 동쪽 산지의 기반암 심도가 얇게 나타났다. 북쪽과 서쪽의 산지의 경우 시추조사 자료보다는 지

표 지층 확보 자료가 주류를 이루므로, 보다 개선된 공간 지층 정보 예측을 위해서는 이 지역 산지와 구릉지에 대한 시추조사 자료 확보가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 GIS 기반 지반정보 시스템 내에서 구축된 지층 두께 및 심도 분포의 삼차원 구역화 지도는 탁월한 가시성이 확보된 정보로서(선창국과 정충기, 2008), 지역적 의사 결정을 포함한 다

양한 지반지진공학 관련 분야에서의 효율성 높은 실무적 활용이 가능하다.

### 홍성 지역의 부지 주기에 따른 지진공학적 공간 구역화

지진 발생시 지표면 부근 지반 운동은 부지 효과에 따라 부지별로 운동의 크기와 주파수 성분이 매우 상이하게 나타날 수 있다. 이와 같은 부지별 고유의 지진응답 특성은 부지 주기( $T_0$ )로 대표될 수 있으며(Kim *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2008), 부지고유 지진응답 특성이 반영된 지반 운동은 구조물의 고유 주기 특성에 따라 공진 현상을 발생시킬 수 있다(Sun *et al.*, 2005). 또한, 최근에는 현행 내진설계 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 제시하고 있다(Rodriguez-Marek *et al.*, 2001; Sun, 2004; Kim and Yoon, 2006). 따라서 부지 주기를 이용한 부지고유 지진응답 예측 기법은 부지 응답 해석과 같은 수치적 기법 없이 구조물의 지진 취약도를 포함한 지역적 지진재해 예측과 더불어 부지별 설계 지반운동 결정을 통한 내진설계 및 내진성능평가에도 직접 활용될 수 있다(선창국, 2009). 본 연구에서는 국내 대표적 지진 피해 지역인 홍성읍의 행정 영역 전체에 대해 지역적 지진재해 예측과 내진 활용을 목적으로 공간 GIS 프레임 기반의 구축 지반정보를 토대로 부지 주기에 대한 구역화를 수행하였다.

광범위한 영역 전체를 대상으로 식 (1)을 적용한 부지 주기의 산정을 위해서는 영역 내 임의의 부지의 깊이별 지층 두께 분포 및 해당 지층의  $V_s$ 에 관한 정량적 값이 필요하다. 본 연구에서는 지반정보 시스템 구축을 통한 기

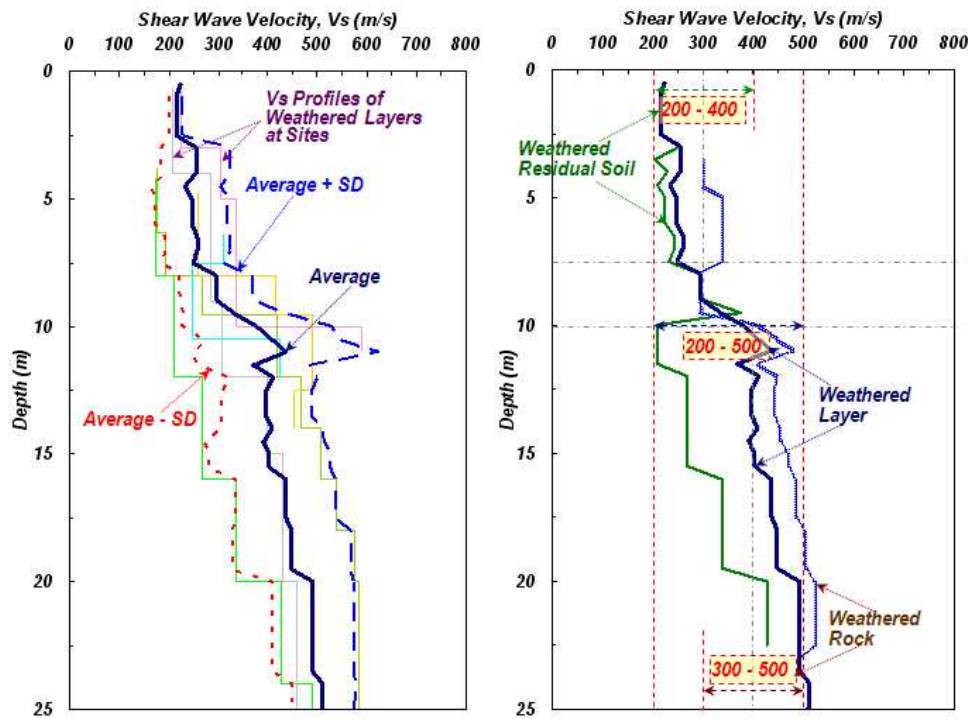


FIGURE 8. 홍성 지역 풍화지층 및 풍화토와 풍화암의 평균 전단파속도 분포

반암 상부 4개 지층(매립토, 퇴적토, 풍화토, 풍화암)에 대한 두께 정보를 부지 주기 산정의 기저 자료로 활용하였다. 더불어 공간 분포  $V_S$  정보도 필요하므로, 대상 홍성 지역에서는 여러 부지들에서 현장 탄성과 시험을 수행하여 깊이 증가에 따른  $V_S$  분포를 획득하였다. 이를 토대로 홍성 각 지층별 대표  $V_S$ 를 결정하였다. 그림 8에는 홍성의 대표적 지층으로서의 풍화지층에 대한 평균  $V_S$  분포를 표준편차(SD)를 고려한 분포들과 함께 좌측 그래프로 제시하였다. 더불어 풍화지층을 이루는 풍화토와 풍화암의 대표  $V_S$  결정을 위한 분포 범위 확인 과정도 그림 8의 우측 그래프로 나타내었다. 이와 같은 지층별 분석을 통해 홍성 지역의 퇴적토, 풍화토 및 풍화암의  $V_S$ 를 각각 330 m/s, 350 m/s 및 450 m/s로 설정하였다. 매립토의  $V_S$ 는 홍성 내의 시험 결과와 기존 국내  $V_S$  연구 결과(Sun, 2004)에 따라 350 m/s로 설정하였다. 부지 주기의 계산 과정에 직접 요구되지는 않지만

참고 자료로 기반암의  $V_S$ 는 기존 사례들(Sun, 2004; Sun and Chung, 2008; 선창국, 2009)과 같이 1,000 m/s로 결정하였다.

대상 영역 내 임의 위치에서의 지층 두께와 각 지층별  $V_S$  자료를 입력 변수로 하여 식 (1)에 따라 GIS 프레임 내에서 홍성읍 영역에 대한 부지 주기를 연산하고 이의 정량적 분포 수준에 따른 공간 분포를 가시적으로 제시하게 된다. 본 연구 대상인 홍성 지역에 대한 부지 주기의 연산 결과를 공간 GIS 기법 내에서 그림 9와 같이 가시적으로 표출하여 지진재해에 관한 공간 구역화를 수행하였다. 상대적 공간 위치 확인을 위해 지표상 배치의 수계 및 건물 레이어들도 중첩 제시하였다.

홍성읍 영역의 부지 주기 분포 정보를 토대로 영역 내 위치별 부지고유 지진응답 특성의 차이를 판단할 수 있다. 홍성 지역의 부지 주기에 관한 전반적인 위치별 값의 분포(그림 9) 경향은 기반암 상부 지층 두께가 부지 주기 산정의 주요 변수임에 따라 앞서 제시된 기반암 심도 분포(그림 7(b))와 대체로 유사

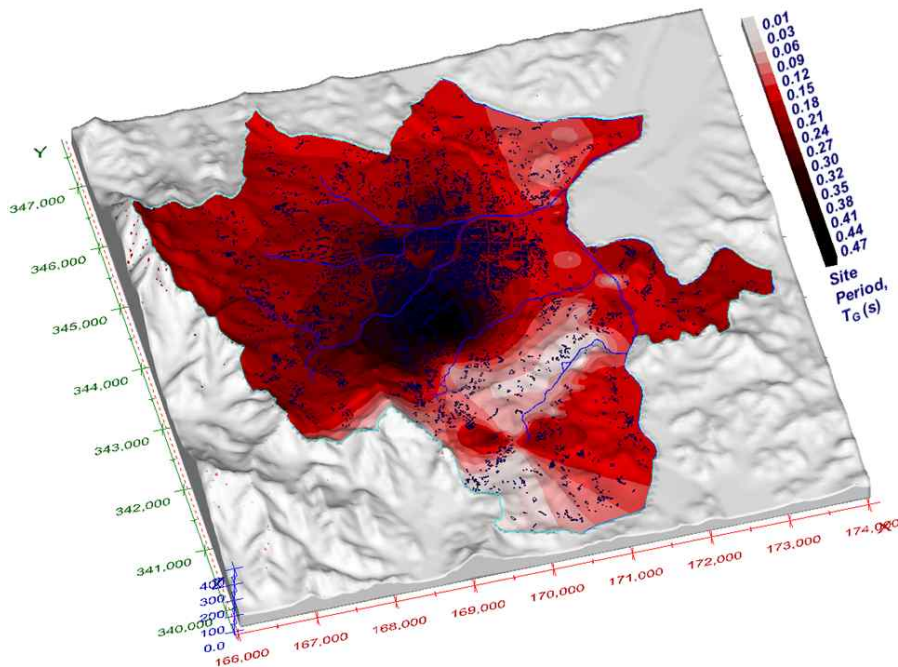


FIGURE 9. 공간 구역화를 통한 홍성읍 영역의 부지 주기 분포

한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구 대상인 홍성읍의 경우 외곽 행정 경계부의 산지나 구릉지에 비해 주거와 산업 시설이 밀집한 시내 중심부의 평지와 구릉지에서 부지 주기가 가장 높게 나타나고 있는데, 약 3 초에서 5 초 정도의 범위를 보인다. 따라서 층수에 따른 건물 고유 주기를 0.1 초로 고려해 볼 때(Kim *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2008), 3 층에서 5 층 정도의 중규모 건축 구조물의 지진 시 공진으로 인한 취약성을 예측할 수 있다. 지방 소도시로서의 홍성읍의 구조물 분포 현황을 고려해 볼 때, 부지 위치에 따라서는 일부 건축 구조물들에 대한 내진 성능평가 및 보강이 필요할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 1978년 지진 발생 시 피해를 입은 상당수 구조물들이 3 층 내지 5 층 정도의 건축물이었는데(과학기술처, 1979), 이와 같은 지역적 부지 응답특성에 상응하는 구조물 피해 사례로 파악해 볼 수 있다.

중소도시 또는 대도시의 경우도 도시 영역 전체에 대한 부지 주기의 지역적 평가는 대상 영역에 위치한 구조물의 지진 취약도 예측 뿐만 아니라 대상 영역 내 구조물에 대한 내진 설계나 내진성능평가 목적의 부지 분류에 활용될 수 있다(Sun *et al.*, 2008; 선창국, 2010). 제한적일 수 있지만 실질적 유용성이 확보되는 이러한 적용을 위해, 본 연구에서는 기존 선행 연구인 선창국(2010)의 국내 부지 증폭계수 결정을 위한 부지 주기 토대의 부지 분류 체계(표 1)를 도입 적용하였다. 즉, 이미 구축된 홍성 지역의 부지 주기에 관한 공간 구역화 정보(그림 9)를 공간 GIS 프레임 내에서 표 1의 부지 분류 경계에 해당되는 부지 주기로 구분 표출하여, 홍성읍 내 임의 부지에서의 부지 증폭계수 결정이 가능한 부지 분류에 관한 공간 구역화 정보로 그림 10에 지표 배치의 도로 레이어와 함께 제시하였다. 이 정보를 토대로 홍성읍 영역 전체에 걸쳐

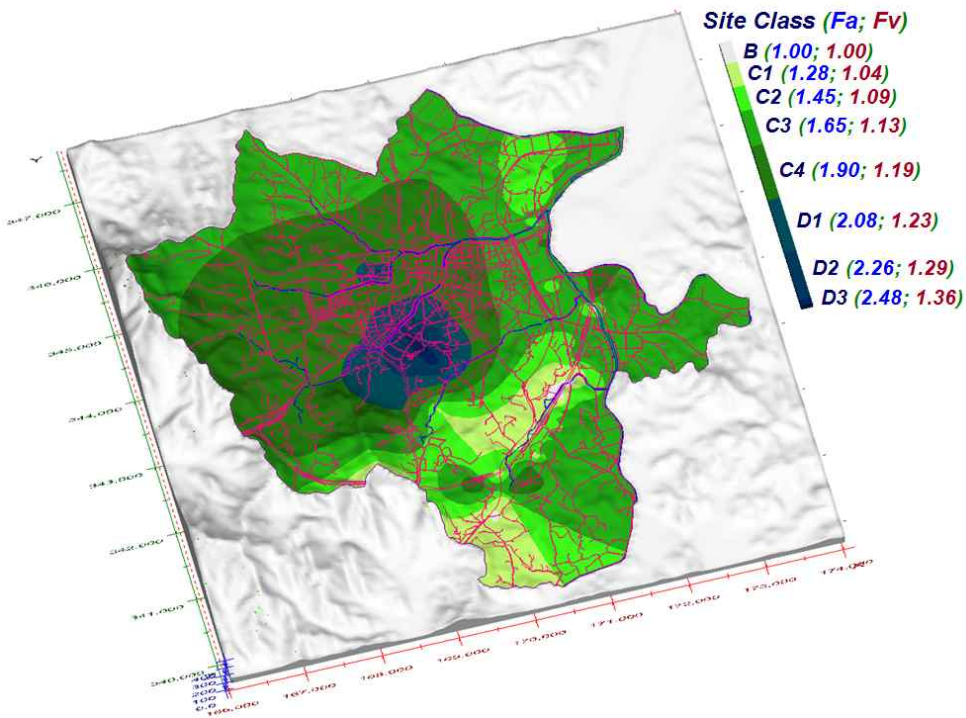


FIGURE 10. 홍성읍에서의 부지 주기에 따른 지진공학적 부지 분류 정보

실제 부지 선정을 통한 내진설계 이전에 예비적 수준의 내진설계 확인을 위한 설계 지반운동 결정이 가능하다. 더불어 구역화된 정보로부터 특정 위치 시설물의 내진성능평가를 위한 기저 정보를 제공받을 수 있다.

홍성 지역 부지 분류 정보(그림 10)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 대상 영역의 주거와 산업이 밀집된 평지 및 구릉지 대부분은 건설교통부(1997)의 현행 부지 분류 C 및 D에 해당된다. 이와 같은 분류 분포는 지진 발생 시 분류 C 및 D에 해당되는 부지들에서 지진동이 증폭되어 지표면 부근 시설물에서의 큰 피해 가능성을 의미한다. 부지 분류 C는 표 1의 세분화된 부지 분류 체계의 하위 4 단계의 세분류(C1부터 C4)를 모두 포함한다. 그러나 부지 분류 D는 홍성의 부지 주기가 최대 약 0.47 초로서 0.54 초(D3와 D4의 경계값)를 초과하는 부지가 존재하지 않으므로 네 단계 중 상위 세 단계 분류(D1, D2 및 D3)로만 평가되었다. 부지 분류 C 및 D에 해당되지 않는 주변 산지의 일부 부지들은 증폭이 발생하지 않는 부지 분류 B로 평가되었다.

이러한 부지 분류 정보를 토대로 대상 지역 내 모든 부지에서의 부지 증폭계수 산정 및 그에 따른 내진설계나 내진성능평가를 위한 설계 지반운동의 결정이 가능하다. 본 연구의 적용 부지 분류 체계(표 1)에 근거한 그림 10(별첨 참조)의 공간 구역화 정보로부터 국내 대표적 계기 지진 피해 지역인 홍성의 부지 증폭계수를 시내 중심지에서 단주기 증폭계수( $F_0$ )의 경우 최대 2.48 정도 그리고 중장주기 증폭계수( $F_L$ )의 경우 최대 1.36 정도로 예측해 볼 수 있다. 이와 같이 단주기 증폭계수가 중장주기 증폭계수에 비해 크게 예측된 것은 국내에서 보편적 기준으로 고려되고 있는 내진설계 기준(건설교통부, 1997)과는 상반되는 현상인데, 국내 지역에 대한 기존 연구 결과(Sun, 2004; Sun *et al.*, 2005; 선창국, 2010)를 반영하여 부지 주기에 따른 부지 분류 체계(표 1)를 공간 구역화에 적용하였기 때문이다. 따라서 국내 도시들에서의 부

지 주기 기반 공간 구역화를 통한 부지 분류와 설계 지반운동의 신뢰성 높은 정보 제공을 위해서는 국내 다양한 지반 조건 부지들에 대한 종합적 특성 평가를 병행한 부지 효과의 정량적 체계화가 향후 진행되어야 할 것이다. 그렇다 할지라도, 본 연구에서의 홍성 지역 대상의 GIS 기반 공간 지반정보 시스템 구축 및 이의 적용을 통한 부지 주기 토대의 지역적 부지 지진응답 예측과 지진공학적 유용 정보 제공 절차 기법은 국내 도시로의 확대 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 결론


국내 대표적 계기 지진 피해 지역인 홍성 지역에 대한 부지고유 지진응답에 따른 지역적 재해 가능성 예측과 내진 활용을 위한 공간 정보 제공을 목적으로, GIS 기법 토대의 지반정보 시스템을 구축하고 부지 지진응답 특성 지표인 부지 주기에 관한 공간 구역화를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 소규모 도시인 홍성 지역에 대해 현장 탐사와 시험을 포함한 지반 조사를 총 16 개소에서 수행하고 연구 영역인 홍성을 행정 영역을 포함하는 8 km × 8 km의 확장 영역 내에서 약 100 개소에 대한 기존 시추조사 자료를 수집하였다. 지반조사 자료 부존 위치들에 대해서는 현장 방문 조사로부터 추가적으로 지표 지층 자료를 확보하여 데이터베이스를 구축하였다. 구축한 데이터베이스를 기저 자료로 삼차원 GIS 프레임 내에서 지구통계학적 크리깅 기법의 적용을 통해 연구 영역에 대한 공간 지층 정보를 보간 예측함으로써 지반정보 시스템을 구축하였다. 삼차원 지층 분포 정보로부터 홍성 연구 영역의 홍성의 노년기 지형 특성과 관련된 토사 두께 변화를 확인하였는데, 대체로 홍성 중심지에서 풍화지층이 두껍게 발달하고 있었다. 또한, 실무적 활용 목적

의 지층 두께 정보 및 기반암 심도에 관한 지표면 투영의 삼차원 공간 분포 정보를 구축 제시하였다.

- (2) 홍성 지역에 대해 구축된 공간 지층 정보와 수행된 현장 탄성과 시험으로부터 도출된 지층별 대표 전단파속도를 이용하여 부지고유 지진응답 특성 및 그에 따른 지역적 지진재해 가능성 예측을 위한 부지주기의 공간 구역화를 GIS 기법 적용을 통해 수행하였다. 이로부터 홍성읍 영역 전체에 대해 지표 지형 변화에 따른 부지별 지진응답 차이를 확인하였다. 구축된 부지 주기 구역화 정보로부터 대상 영역 중앙 평지 및 구릉지에서의 부지 주기 분포가 0.3 초에서 0.5 초 정도를 보이고, 그에 따라 3 층에서 5 층 정도 증규모 건축 구조물의 지진 취약 가능성을 직관적으로 확인할 수 있었다.
- (3) 국내 지역의 부지 효과 평가 및 정량화에 관한 기존 연구 결과들을 고찰하여 부지 증폭계수 결정이 가능한 부지 주기 기반의 부지 분류 체계를 도입 적용하였으며, GIS 기법 프레임 내에서 홍성읍 전체에 걸쳐 임의 부지에서 부지 분류에 따른 증폭계수 결정이 가능한 공간 구역화 정보를 추가적으로 제공하였다. 대상 영역 내의 주거와 산업 시설이 밀집한 평지 및 구릉지에서 대부분 부지 분류 C 및 D로 구분되었으며, 단주기 지반 증폭계수는 최대 2.48 정도 그리고 중장주기 지반 증폭계수는 최대 1.36 정도로 예측되었다. 이와 같이 지진공학적 정량화 정보 제공이 가능한 본 연구의 홍성 지역에 대한 절차 기법은 향후 국내 도시 지역으로의 확대 적용이 가능할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2008-5504)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 

### 참고문헌

- 과학기술처. 1979. 홍성지진의 현황 조사연구. 321쪽.
- 건설교통부. 1997. 내진설계기준연구(II). 708쪽.
- 선창국. 2009. 공간 GIS 기반의 지반 정보 시스템 구축을 통한 대전 지역의 부지 응답에 따른 지진재해 구역화. 한국지반공학회논문집. 25(1):5-19.
- 선창국. 2010. 지역고유 지진응답 특성 정량화를 통한 국내 부지 분류 기준의 추가 반영 제안. 지구물리와 물리탐사 13(3):203-218.
- 선창국, 김보현, 정충기. 2006. 홍성 지역 화강 풍화 지층의 풍화도 및 전단파 속도에 관한 고찰. 대한토목학회논문집. 26(6C):431-443.
- 선창국, 양대성, 정충기. 2005a. 서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가. 한국지진공학회논문집. 9(4):29-42.
- 선창국, 정충기. 2006. GIS를 이용한 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템 구축 기법의 개발 및 적용. 한국지반공학회논문집. 22(2):55-68.
- 선창국, 정충기. 2008. GIS 기반의 지반 정보 시스템 구축을 통한 경주 지역 부지고유 지진 응답의 지역적 평가. 한국지리정보학회지 11(2):38-50.
- 선창국, 정충기, 김동수. 2005b. 국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계 제안. 한국지반공학회논문집. 21(6):101-115.
- 선창국, 정충기, 김재관. 2008. 쌍계사 오층 석탑 부지의 지진 응답 특성 평가를 통한 1936년 지리산 지진 세기의 정량적 분석. 대한토목학회논문집. 28(3C):187-196.
- 이금삼, 조화룡. 2000. DEM을 이용한 한반도 지형의 경사도 분석. 한국지리정보학회지 3(1):35-43.



- 장용구, 이상훈, 구지희. 2007. 지반정보 DB 활용향상을 위한 유통시스템 개발. 한국지리정보학회지 10(1):183-193.
- GeoInfo 지반정보. 2006. 지반정보통합 DB 시스템. <http://www.geoinfo.or.kr>, 2009년 7월 접속.
- 천성호, 선창국, 정충기. 2005. 지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용. 대한토목학회논문집. 25(2C):103-115.
- ABAG. 1995. ABAG Maps and Information. Association of Bay Area Governments. Regional Planning and Services Agency for the Nine-Country San Francisco Bay Area.
- Apostolidis, P., D. Raptakis, Z. Roumelioti and K. Pitilakis. 2004. Determination of S-wave velocity structure using microtremors and spac method applied in Thessaloniki (Greece). Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24(1):49-67.
- Autodesk. 2007. AutoCAD Civil 3D 2008 Tutorials. Autodesk, Inc., San Rafael, USA.
- CTech. 2008. EVS/MVS Main Help Version 9.13. CTech Development Corporation, Laie, USA.
- Dobry, R., R.D. Borcherdt, C.B. Crouse, I.M. Idriss, W.B. Joyner, G.R. Martin, M.S. Power, E.E. Rinne and R.B. Seed. 2000. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, Earthquake Spectra 16(1):41-67.
- Fah, D., F. Kind, K. Lang and D. Giardini. 2001. Earthquake scenarios for the city of Basel. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 21(5):405-413.
- Field, G. and SCES Phase III Working Group. 2000. Accounting for sit effects in probabilistic hazard analyses of southern California: Overview of the SCEC Phase III Report. Bulletin of the Seismological Society of America 90(6B):S1-S31.
- Gangopadhyay, S., T.R. Gautam and A.D. Gupta. 1999. Subsurface characterization using artificial neural network and GIS. Journal of Computing in Civil Engineering ASCE 13(3):153-161.
- Ghasemi, H., Z. Mehdi, Y. Fukushima and F. Sinaeian. 2009. Applying empirical methods in site classification, using response spectral ratio (H/V): A case study on Iranian strong motion network (ISMN). Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29(1):121-132.
- Jian, X., R.A. Olea and Y.S. Yu. 1996. Semivariogram modeling by weighted least squares. Computers & Geosciences 22(4):387-397.
- Jimenez, M.J., M. Carcia-Fernandez, G. Zonno and F. Cella. 2000. Mapping soil effects in Barcelona, Spain, through an integrated GIS environment. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19(4):289-301.
- Kienzle, A., D. Hannich, W. Wirth, D. Ehret, J. Rohn, V. Ciugudean and K. Czurda. 2006. A GIS-based study of earthquake hazard as a tool for the microzonation of Bucharest. Engineering Geology 87(1-2):13-32.
- 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.
- Kim, D.S. and J.K. Yoon. 2006. Development of new site classification system for the regions of shallow bedrock in Korea. *Journal of Earthquake Engineering* 10(3):331-358.
- 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.
- Lin, C.C.J. and J.F. Chai. 2008. Reconnaissance report on the China Wenchuan earthquake May 12, 2008. *NCREE Newsletter* 3(3):1-5.
- Martinelli, A., G. Cifani, G. Cialone, L. Corazza, A. Petracca and G. Petrucci. 2008. Building vulnerability assessment and damage scenarios in Celano (Italy) using a quick survey data-based methodology. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28(10-11):875-889.
- Oh, S. and C.G. Sun. 2008. Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam. *Environmental Geology* 54(1): 31-42.
- Poland, C.D. 2010. The 21st century goal for seismic safety resilient cities. *Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. Toronto, Canada, Jul. 25-29, 2010, Paper No. 1894.
- Rodriguez-Marek, A., J.D. Bray and N.A. Abrahamson. 2001. An empirical geotechnical seismic site response procedure. *Earthquake Spectra* 17(1):65-87.
- 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. 375pp.
- Sun, C.G. and C.K. Chung. 2008. Assessment of site effects of a shallow and wide basin using geotechnical information-based spatial characterization. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28(12):1028-1044.
- 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.
- 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.