

## 역사 지진 피해 발생 읍성 지역에 대한 부지 고유의 지진 응답 특성 평가

선창국<sup>1\*</sup> · 정총기<sup>2</sup> · 김동수<sup>3</sup> · 김재관<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지진연구센터, <sup>2</sup>서울대학교 지구환경시스템공학부

<sup>3</sup>한국과학기술원 건설및환경공학과

### Evaluation of Site-specific Seismic Response Characteristics at Town Fortress Areas Damaged by Historical Earthquakes

Chang-Guk Sun<sup>1\*</sup>, Choong-Ki Chung<sup>2</sup>, Dong-Soo Kim<sup>3</sup>, and Jae-Kwan Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Dept. of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

<sup>3</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

역사 지진으로 인해 성첩이 붕괴되었던 국내 두 읍성 지역에 대한 국부적 부지 효과를 평가하기 위하여, 현장 시추 조사 및 단성과 시험을 통해 전단파속도( $V_s$ ) 주상을 포함한 지반 특성을 결정하고 이를 토대로 등가 선형 기법의 부지 응답 해석을 수행하였다. 대상 부지는 심도 30 m까지의 평균 전단파속도가 500~850 m/s의 분포를 보임에 따라 지반 분류 C와 B로 구분되었고, 부지 고유주기는 성벽과 성첩의 고유주기를 포함하는 범위인 0.06~0.16초의 단주기 분포를 보였다. 대상 영역에서의 부지 응답 해석 결과, 지반 분류 B와는 달리 대부분의 부지 조건인 지반 분류 C의 경우 부지 고유 지진 응답 특성인 단주기에서의 큰 증폭으로 인해, 국내 내진 설계 기준의 단주기(0.1~0.5초) 증폭계수  $F_a$ 와 중장주기(0.4~2.0초) 증폭계수  $F_v$ 는 각각 지반 운동을 단주기 영역에서는 과소평가하고 중장주기 영역에서는 과대평가함을 확인하였다. 이러한 부지 고유 응답 특성은 단주기 고유 응답을 보이는 성벽 구조물이 지진 발생 시 공진이 발생할 가능성이 높음을 의미하며, 그에 따라 역사 지진 피해 사례인 성첩 붕괴의 지배적인 영향 인자로서 작용했을 것으로 판단된다.

**주요어 :** 부지 효과, 부지 증폭계수, 부지 응답 해석, 전단파속도, 부지 고유주기

In order to evaluate the local site effects at two town fortress areas in Korea where stone parapets were collapsed by historical earthquakes, site characteristics were assessed using site investigations such as borehole drillings and seismic tests. Equivalent-linear site response analyses were conducted based on the shear wave velocity ( $V_s$ ) profiles and geotechnical characteristics determined from site investigations. The study sites are categorized as site classes C and B according to the mean  $V_s$  to 30 m ranging from 500 to 850 m/s, and their site periods are distributed in the short period range of 0.06 to 0.16 sec, which contains the natural period of fortress wall and stone parapet. From the results of site response analyses in the study areas, for site class C indicating most of site conditions, contrary to site class B, the short-period (0.1-0.5 sec) and mid-period (0.4-2.0 sec) site coefficients,  $F_a$  and  $F_v$  specified in the Korean seismic design guide, underestimate the ground motion in short-period band and overestimate the ground motion in mid-period band, respectively, due to the high amplification in short period range, which represent the site-specific seismic response characteristics. These site-specific response characteristics indicate the potential of resonance in fortress walls during earthquake and furthermore could strongly affect the collapse of parapets resulted from seismic events in historical records.

**Key words :** site effects, site coefficients, site response analysis, shear wave velocity, site period

\*Corresponding author: pungsun@kigam.re.kr

## 서 론

지진 재해에 대한 국가적 종합 대응 체계 확립을 위해서는 우선 해당 지역의 지진 특성 파악이 선행되어야 한다. 이를 위해 최근 국내 주요 기관들에서는 지진 관측 시설을 확충하여, 지진 자료를 수집하고 지진학적 및 지질학적 관점에서 이를 분석하여 지진 재해의 원인을 분석하고 방재 시스템을 구축하고자 노력을 기울이고 있다. 이러한 계측에 의한 계기 지진 기록은 1905년에 시작되었지만, 충남 홍성에서 비교적 큰 지진(규모 5.0)이 발생한 1978년 까지만 해도 그 활용은 매우 미미한 상태였고, 그 이후 지진 재해에 대한 관심이 높아지고 관측 시설들이 확충되면서 이용한 다양한 연구가 수행되고 있다(한국지질자원연구원, 2005). 그렇다 할지라도 아직까지는 내진 설계와 같은 공학적 측면의 실무적 활용을 위한 계기 지진 자료의 확보는 부족한 상황이며, 실제 국내 설계 지반 운동의 기본 정보인 성능 및 지역별 발생 가능 지진 세기는 주로 역사 문헌상의 지진 기록을 토대로 결정되어 있다(Sun *et al.*, 2005).

역사 지진 기록에 의존하는 지진 세기 평가 과정 중에는 여러 가지 불확실성이 필수적으로 수반된다. 그 중에서도 지진 피해 부지의 정확한 위치 그리고 피해 구조물의 구조적 특성은 지진 세기 평가에 매우 중요한 요소이다. 즉, 과거 역사 기록상에 존재했던 지표면 부근 구조물에 작용하는 지진 세기의 정확한 평가를 위해서는 피해 구조물의 특성 및 손상 정도뿐만 아니라 국부적 지질 조건으로 인한 지진 증폭 특성 평가를 위해 정확한 위치 파악이 반드시 선행되어야 한다. 특히, 과거 역사 문헌에서는 지진 피해 지역을 행정 구역 위주로 기록하기 때문에 정확한 위치를 파악하기가 어렵고, 따라서 위치에 따라 변화의 폭이 크게 나타날 수 있는 지반 특성에 따른 부지 효과를 평가하는 것이 불가능하다. 또한 피해 기록이 묘사된 구조물도 구체적인 토담, 나무 등으로만 묘사되어 정량적인 유발 원인이 되는 지진동을 정량적으로 가늠하기가 어렵다. 본 연구에서는 국내 역사 문헌상의 구조물 지진 피해 사례를 조사하여(과학기술부, 2000), 수많은 지진 피해 사례 중 기록상의 피해 구조물이 보존되어 그 구조적 특성과 함께 지리적 위치를 구체적으로 확인할 수 있는 충남 해미와 경남 사천의 두 읍성 지역을 대상으로 지진 증폭과 관련된 부지 효과의 정량화를 수행하였다. 대상 지역에서는 현장 지반 조사를 수행하여 지질 조건 및 지반 동적 특성을 파악하고, 이를 기본 정보로 이용하여 지진 응답 해

석을 수행함으로써 부지 고유의 지진 응답 특성을 평가하였다.

## 부지 효과 정량화를 위한 지반 증폭계수 및 지반 분류

진원에서 다양한 형태의 단층 운동으로 발생된 지진 파는 일반적으로 거리에 따라 감쇠되고 에너지의 크기 역시 작아지게 된다. 한편 인간이 직접 체험하는 지표면 부근 지진동의 크기 및 형태는 진원이나 진앙으로부터 동일 거리라 하더라도 기반암까지의 전파 경로뿐만 아니라 기반암부터 지표면까지 구성 지반 특히 토사의 동역학적 특성별 응답 거동에 따라 크게 달라질 수 있다. 이러한 지진 시 각 부지의 응답 특성은 지반의 지질 및 동적 특성에 따라 발생 지진의 재현주기별로 정량화된 단주기(short-period)와 중장주기(mid-period 또는 long-period)의 지진 계수(seismic coefficient)인  $C_a$ 와  $C_v$ 의 형태로 내진 설계 기준에 반영되어 있다(건설교통부, 1997). 지진 계수를 토대로 발생 지진과 부지 특성에 따라 설계 지반 운동의 구조물 주기에 따른 응답 형상인 표준 설계 응답 스펙트럼을 작성하여 실제 내진 설계나 내진 성능 평가를 수행한다. 지진 계수인  $C_a$  및  $C_v$ 는 식 (1) 및 식 (2)와 같이, 대상 지역의 지진학적 고찰을 토대로 도출된 지역(지진 구역) 계수(seismic zone factor,  $Z$ )와 단주기(0.1~0.5초) 및 중장주기(0.4~2.0초)의 지반 증폭계수(site coefficient; site (amplification) factor)인  $F_a$  및  $F_v$ 의 곱의 형태로 표현될 수 있다(선창국 등, 2005a).

$$C_a = Z \times F_a \quad (1)$$

$$C_v = Z \times F_v \quad (2)$$

지반의 증폭계수는 기반암이 노출된 지표면(기반암 노두)과 기반암이 노출되지 않고 토사 등으로 덮인 지표면의 상대적인 지반 운동 크기 비율로 표현되는 지표이며, 지반 운동의 구조물 주기( $T$ )별 응답 스펙트럼(Response Spectrum,  $RS$ )이나 푸리에 스펙트럼(Fourier Spectrum,  $FS$ )을 이용하여 결정할 수 있다(Dobry *et al.*, 2000; Sun *et al.*, 2005). 식(3)과 식(4)는 각각 응답 스펙트럼 기반의 단주기와 중장주기 증폭계수의 계산식으로서, 표현된 계산식에서 적분 대상을 통칭하여 기반암 노두에 대한 지표면의 응답 스펙트럼 비(Ratio of Response Spectra,  $RRS$ )라고 하며, 응답 스펙트럼( $RS$ ) 대신 푸리에 스펙트럼(Fourier Spectrum,  $FS$ )이 적



반 증폭 특성 반영을 위한 개선이 필요한 실정이며, 최근 이와 관련된 다각적인 연구들이 진행 중이다(Sun, 2004; Sun *et al.*, 2005; 윤종구, 2006). 특히, 지반 증폭계수의 정량화 기준인 지반 분류 매개 변수의 지역적 특성을 반영한 합리적 개선의 일환으로, 기존의  $V_{G30}$ 을 대체하거나 보완할 수 있는 지반 분류 기준으로 지질 조건을 대표하는 기반암 심도(bedrock depth,  $H$ )나 지질 조건과 더불어 동적 특성을 반영하는 부지 고유주기(site period,  $T_G$ )를 제시하는 연구들이 국내(Sun, 2004; 윤종구, 2006) 뿐만 아니라 NEHRP 규정과 UBC의 근간이 되는 미국 서부 지역(Rodriguez-Marek *et al.*, 1999)을 대상으로도 수행된 바 있다.

### 대상 읍성 지역의 기본 정보

본 연구에서는 우리나라 역사 문헌 기록을 토대로 과거 지진 피해가 발생했던 해미 읍성과 사천 읍성의 두 지역을 대상으로 역사 지진 세기의 정량적 평가의 일환으로 부지 고유의 지진 응답 특성을 평가하고자 문헌 고찰과 더불어 부지 답사 및 지반 조사를 실시하였다.

### 대상 읍성 지역의 역사적 정보

역사 문헌에 기록되어 있는 지진 발생에 따른 자연 현상이나 구조물 피해 사례에는 이미 언급된 지역적 모호성과 더불어 자연 현상이나 구조물 피해 현상의 정성적 기술에 따른 불확실성이 존재한다. 이러한 불확실 요인들은 역사 지진 세기의 정량적 평가를 통한 국내 발생 가능 지진 세기 결정의 난제(難題)로 작용할 수 있음에 따라, 본 연구에서는 불확실 변수가 지배적이지 않고

상대적으로 객관적인 지진 피해 사례로 고려될 수 있는 지진 발생에 따른 성첩(城堞) 붕괴를 정량적 지진 피해 사례로 선택하였다. Table 2는 역사 문헌에 기록된 지진 시 성첩 붕괴 사례(과학기술부, 2000; 맹승원, 2001)를 대표적으로 정리 기술한 것으로서, 이 중 해미와 사천 지역의 지진에 의한 성첩 붕괴 사례를 근거로 두 지역을 부지 고유 지진 응답 특성 평가의 대상 지역으로 선정하였다.

본 연구의 대상인 해미 읍성과 사천 읍성에서는 Table 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 각각 1518년(중종 13년)과 1700년(숙종 26년)에 성첩 붕괴가 발생하였다. 여장(女牆)이라고도 불리는 성첩(城堞)은 방어와 공격의 두 가지 목적을 위해 성벽 위에 추가로 설치한 구조물로서, 현존하는 국내 성벽과 성첩 구조의 일반적인 형태는 Fig. 1의 개요도와 같고 주로 조선 시대의 양식을 반영한 것이며(맹승원, 2001), 성벽 단면의 전형적인 치수도 삽입 그림에서 확인할 수 있다. 실제, 역사 문헌 상에 기록된 성첩 붕괴 사례에서 성첩에 작용한 지진동은 지반으로부터 전달된 지진파가 성벽을 통해 전달된 진동 하중이다. 따라서 대상 부지 고유의 지진 응답 특성뿐만 아니라 성벽의 지진 응답 특성 또한 성첩 붕괴의 중요한 요인이며, 이는 성벽의 진동에 따른 공진 특성을 나타내는 고유주기(natural period)를 통해 정량적으로 확인할 수 있다. 국내 성벽(Fig. 1의 삽입 그림 참조)의 고유주기는 0.13초 정도의 단주기 특성을 보이며(맹승원, 2001), 이는 부지가 단주기 증폭 특성을 보이거나 발생 지진파가 단주기(고주파수) 특성이 우세할 경우, 성벽 저면에 전달된 지진동에 비해 크게 증폭된 지진동이 상부의 성첩에 전달될 가능성을 의미한다. 특히, 성

Table 2. Representative cases of the collapse of parapet listed in historical seismic damage records.

발생 일시	지역	기록 내용
1518년 7월 2일 (중종 13년 5월 15일)	서울	酉時에 세차레 크게 지진이 있었다. 그 소리가 마치 성난 우뢰 소리처럼 컷 인마가 모두 피하고, 담장과 성첩이 무너지고 떨어져서, ...
	충청도	... 해미 현감 ... 지진 상황을 보고하기를 “...우뢰와같은 소리가 동쪽으로부터 일어났는데, 사람이 제대로 서지 못하고 여러 곳의 성첩들이 계속 무너졌으며,...” 하였다.
1643년 7월 24일 (인조 21년 5월 30일)	경상도	경상도의 대구, 안동, 김해, 영덕 등 고을에서도 지진이 일어나, 연대와 성첩이 무너진 곳이 많았다.
1700년 4월 29일 (숙종 26년 3월 11일)	경상도	경상도 대구 등의 24개 고을에서 지진이 일어나 진주, 사천 사이의 성첩이 무너지고 길가는 사람이 넘어졌다.
1727년 6월 20일 (영조 3년 5월 2일)	함경도	함흥 등 7개 읍에 지진이 일어나 가옥과 성첩이 많이 무너지고 내려앉았다.
1810년 2월 19일 (순조 10년 1월 16일)	함경도	함경 감사 ... 아뢰기를, “이달 16일 未時에 명천, 경성, 회령 등지에 지진이 일어나 집이 흔들리고 성첩이 무너졌으며, ...

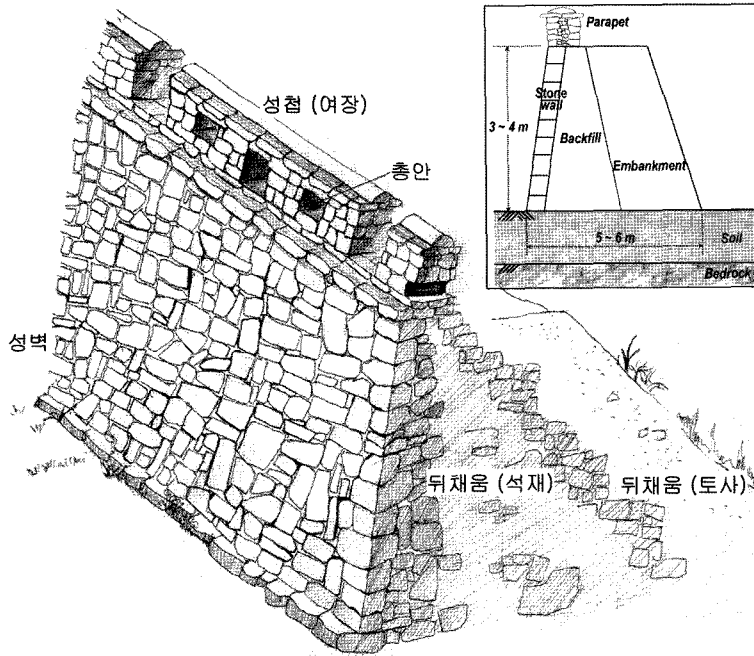


Fig. 1. Sketch of stone wall and parapet for fortress in Korea.

벽 고유주기에 해당되는 지진과 성분이 지반을 통해 지배적으로 전파되면 공진(resonance)이 발생하고, 그로 인해 비교적 작은 크기의 지진에 의해서도 성첩이 붕괴될 수 있다. 즉, 부지 고유의 지진 응답 특성에 따라 성벽에 전달되는 지진파의 특성이 차이를 보일 수 있으며, 이에 따라 지진 시 성첩의 붕괴 취약 정도가 달라질 수 있다. 그러므로 역사 문헌상에 기록된 성첩 붕괴 사례를 통한 지진 세기의 정량적 평가를 위해서는 해당 부지 지반의 지진 전파 특성이 우선적으로 평가되어야 한다.

**읍성 지역의 지질 조건 및 지반 동적 특성**

해미 읍성은 1407년(태종 7년)에 해미현을 설치한 이래로 1491년(성종 22년)에 축성된 성벽과 그 상부의 성첩이 거의 온전한 형태로 현재까지 보존된 곳으로서 당시의 전형적인 읍성 형태를 확인할 수 있다. 반면, 사천 읍성은 1445년(세종 27년)에 축성되었으나 현재는 북쪽 산지의 일부 성벽을 제외하고는 거의 훼손된 상태이며, 문헌(四川郡, 1899; 사천문화원, 1989)을 고찰하여 사천 읍성의 성벽 영역을 추정하였다.

두 대상 읍성 지역의 지질 특성을 대표하는 기반암은 다소 상이하게 파악되었는데, 해미 읍성은 거의 전역이 중생대 쥐라기의 대보 화강암류로 구성된 반면(신병우

등, 1989), 사천 읍성은 중생대 백악기의 경상계 퇴적암류로 구성되어 있다(최유구와 유병화, 1969). 해미 읍성과 사천 읍성은 두 지역 모두 북쪽에 산지를 끼고 능선을 따라 남쪽 평지까지 포함하는 전형적인 평사성의 형태를 보이고 있다. 해미 읍성은 성벽 밖의 북서쪽과 북동쪽에 비교적 높은 산지가 존재하고 읍성 영역은 북동쪽 산지의 지류에서부터 시작하여 남쪽의 작은 하천 이전의 평지까지 분포하며(Fig. 2), 성벽의 총 길이는 1,800 m 정도이다. 따라서 읍성 남서쪽의 반정도 영역에서는 평야지의 지형적 특성을 보이고 북동쪽의 반정도 영역에서는 구릉 및 산지의 지형적 특성을 보인다(Fig. 2). 또한, 사천 읍성은 인근에 높은 산지나 하천은 존재치 않지만 북동쪽의 산지와 남동 및 남서쪽의 평지를 그 영역으로 하며, 성벽의 총 길이는 1,400 m 정도로 기록되어 있다(四川郡, 1899). 추정되는 읍성 영역 내부에서는 해미읍성과 유사하게 남서쪽의 반정도 영역에서는 평야지의 지형적 특성을 보이고 북동쪽의 반정도 영역에서는 구릉 및 산지의 지형적 특성을 보인다. 이러한 지형적 특성을 토대로 볼 때, 해미 및 사천읍성은 하천이나 유수에 의한 퇴적층의 발달은 미약하고 평지에서도 비교적 얇은 심도에 기반암이 분포할 가능성이 있다.

일반적으로 읍성 지역은 문화 유적지로서 개발이 제

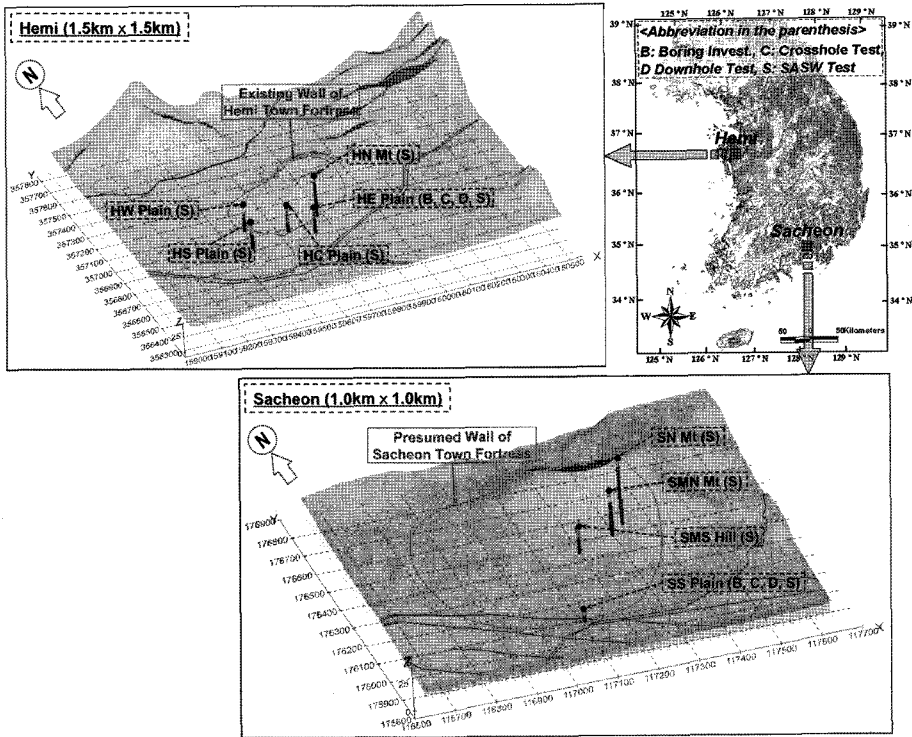


Fig. 2. Location and contents of site investigation for town fortress areas.

한됨에 따라 기초적인 지형 및 지질 자료를 제외하고는 지반 특성 파악을 위해 활용 가능한 지반 조사 자료가 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지반 구성 및 동적 특성의 종합적 평가를 목적으로 현존하는 해미 읍성과 추정된 사천 읍성 영역에 대한 시추 조사 및 깊이 따른 전단파속도( $V_s$ ) 분포 결정을 위한 현장 탄성파 시험을 수행 하였다. 해미와 사천 읍성의 지리적 위치 및 지역별로 수행된 지반 조사 내용은 Fig. 2와 같다. 지반 조사는 대상 지역의 지형 특성을 고려하여 선정하였으며, 해미 읍성의 경우 산지 1개소와 평지 4개소에서 그리고 사천 읍성의 경우 산지 2개소, 구릉 1개소 및 평지 1개소에서 지반 조사를 수행하였다. 각 지역별로 1개소의 종합 조사 부지(해미의 HE Plain 부지와 사천의 SS Plain 부지)에서는 시추 조사와 크로스홀(crosshole), 다운홀(downhole) 및 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 시험이 모두 수행되었으며, 그 외 부지에서는 SASW 시험만이 실시되었다.

시추 조사와 현장 탄성파 시험 결과를 종합적으로 분석하여 읍성 지역의 지층 구성을 파악하였으며, 매립토(fill), 퇴적토(alluvial soil), 풍화 잔류토(weathered

residual soil), 풍화암(weathered rock) 그리고 연암(soft rock)을 포함한 기반암(bedrock)의 총 5 종류로 구분하였다(선창국 등, 2005b). 현장 지반 조사로부터 파악된 두 지역의 깊이에 따른 지층 구성은 Fig. 3과 같다. 지층 구성의 파악을 위하여 시추 부지에서는 조사 결과를 직접 활용하였으며, SASW 시험만 수행한 부지에서는 시추 부지에서의  $V_s$ 에 따른 지층 분포와 지형 특성을 종합 분석하여 지층 구성을 파악하였다(Sun *et al.*, 2005). 또한, Fig. 3에는 각 부지의 깊이에 따른  $V_s$  분포도 삽입 도시 하였는데, 다양한 현장 탄성파 시험이 수행된 HE Plain 부지와 SS Plain 부지의 경우 대표  $V_s$  추상을 도출하여 제시하였다(Sun *et al.*, 2005). 공학적 기반암(engineering bedrock)인 연암(선창국 등, 2005b)까지의 심도는 상대적으로 넓은 면적의 평지를 포함하고 풍화 지층 상부에 다소의 퇴적토가 발달한 해미 읍성이 대부분의 영역이 산지와 구릉지로 구성된 사천 읍성에 비해 깊게 분포하고 있다. 두 대상 지역에서 파악된 지층 구성으로 볼 때, 해미 읍성에서는 평지를 중심으로 기반암 위의 풍화암 및 토사에서의 지진 증폭 가능성이 높을 것으로 보이는 반면, 사천 읍성에서는 그에

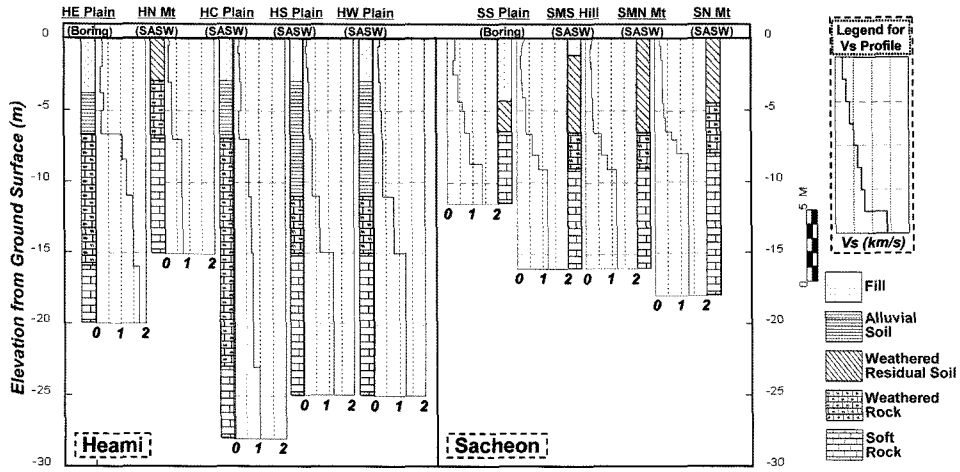


Fig. 3. Geological layers and shear wave velocity ( $V_s$ ) profiles of testing sites.

비해 상대적으로 증폭 가능성이 낮을 것으로 추정된다.

### 읍성 지역에 대한 지진 응답 해석

본 연구에서는 역사 지진 피해가 발생했던 읍성 지역의 부지 효과를 정량적으로 평가하고자, 해미와 사천 읍성의 두 지역 내 9개소의 부지들을 대상으로 일차원 등가선형 기법의 지진 응답 해석을 수행하였다.

#### 일차원 등가선형 부지 응답 해석

지진 응답 해석은 반무한 수평 다층 지반을 수직으로 전파하는 전단파를 대상으로 일차원의 부지 응답을 평가할 수 있는 SHAKE91(Idriss and Sun, 1992)을 이용하였으며, 이미 이 프로그램은 국내외의 다양한 지반 조건에 대해 광범위하게 활용되어 왔다(Dobry *et al.*, 2000; Sun *et al.*, 2005). SHAKE91을 이용한 해석 시 지반 강성과 감쇠 특성의 비선형 거동을 모사하기 위하여 등가선형 기법이 적용되며, 이러한 일차원 등가선형 기법은 해석 방법이 간단할 뿐만 아니라 결과의 신뢰성이 높고, 실제 계측 자료와의 비교 연구 자료가 폭넓게 축적되어 있기 때문에 내진 설계의 실용적인 측면에서 많이 활용되고 있다(Dobry *et al.*, 2000; 선창국 등, 2005b).

일차원 등가선형 지반 응답 해석은 지층을 통과하는 지진파의 증폭을 분석하기 위하여 파의 각 주파수 성분에 대한 진폭을 계산한 전달 함수(transfer function)를 이용한다(Schnabel *et al.*, 1972). 전체 토층이 여러 개의 지층으로 구성되어 있고 각 층에서의 강성은 일정하

다고 가정하면, 특정한 두 지점 사이의 전달 함수는 두 지점의 응답 변위의 비로써 정의된다. 감쇠성의 탄성 기반암(elastic bedrock) 위에 두께  $H$ 의 토사가 존재하는 지층 조건에서의 토사 지표면 대 기반암 노두의 전달 함수는 식 (6)과 같다.

$$F = \frac{1}{\cos((\omega H/V_s^*) + ia_z^* \sin(\omega H/V_s^*))} \quad (6)$$

여기서,  $\omega$ 는 전달 지진파의 주파수,  $V_s^*$ 는 감쇠비를 갖는 복소수 형태의 토사에 대한  $V_s$ , 그리고  $a^*$ 는 감쇠비를 갖는 복소수 형태의 토사 대 기반암의 임피던스 비를 나타낸다. 식 (6)에서 전달 함수의 공진 주파수에 영향을 주는 요소는 토사의 전단파속도와 토층 두께(또는 기반암 심도,  $H$ )이며, 증폭 크기는 공진 주파수 영향 요소들과 더불어 감쇠비 및 토층 대 기반암의 임피던스 비(impedance ratio)에 따라 좌우된다. 특히 기반암의 강성(전단파속도)이 매우 커서 임피던스 비가 작고 토사의 감쇠비가 작은 경우에 식 (6)의 전달 함수가 최대의 값을 보이는 기본 공진 주파수(fundamental resonance frequency,  $\omega_0 = 0.5\pi V_s^*/H$ )를 결정할 수 있으며, 이에 따라 기반암 상부 지층 부지에 대한 고유주기(site period,  $T_G = 4H/V_s$ )를 산정하여 부지의 응답 특성을 간편하게 예측할 수 있다. 이처럼 간편하게 결정된 부지의 고유주기는 일차원 등가선형 지진 응답 해석의 전달함수로부터 확인되는 공진 주기와 거의 일치하는 경향을 보인다(Kim *et al.*, 2002). 또한, 부지 고유주기( $T_G$ )는 각 부지의 기반암까지의 지층 두께(심도)와 그  $V_s$ 를 토대로 식

(7)과 같이 기반암 상부 토사 전체의 대표적인  $V_S$  대신 토사 지층별 강성 변화를 고려하여 결정함으로써 보다 합리적으로 지반 응답 특성을 예측할 수 있다. 식 (7)에서  $D_i$ 와  $V_{Si}$ 는 각각 기반암 심도( $H$ )까지의  $i$ 번째 지층의 두께( $H = \sum D_i$ )와 평균  $V_S$ 를 의미한다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{Si}} \quad (7)$$

**대상 부지에 대한 지진 응답 해석**

각 대상 부지에 대한 지진 응답 해석은 1 종류의 인공(Artificial) 지진과 국내에서 보편적으로 적용되고 있는 3종류의 계측 지진들(EI Centro, Hachinohe 및 Ofunato 지진)의 입력 지진을 토대로 해석을 수행하였다. 해석은 지반 조사 결과로부터 파악된 깊이에 따른 지층 구성과  $V_S$  분포를 입력 정보로 활용하여 국내 내진 설계 기준(건설교통부, 1997) I등급 붕괴방지 수준(Collapse Level of Earthquake, CLE)과 기능수행 수준(Operation Level of Earthquake, OLE)에 대해서 실시하였으며, 지진파의 최대 가속도는 각각 1000년과 100년 재현주기의 국내 지진 재해도를 근거로 해미 읍성의 경우 0.130 g와 0.047 g 그리고 사천 읍성의 경우 0.120 g와 0.044 g로 조정하여 입력하였다. Fig. 4는 해미 읍성 입력 지진들의 CLE(0.130 g)에 대한 암반 노두 가속도 응답 스펙트럼으로서 현행 내진 설계 기준(Sun et al., 2005)의 지반 분류 B에 해당되는 보통암 지반의 설계 응답 스펙트럼과 함께 도시하였다. 깊이별  $V_S$  분포와 더불어 등가선형 부지 응답 해석 시 요구되는 전단변형률에 따른 지반의 정규화 전단탄성계수(normalized shear modulus,  $G/G_0$ ) 및 감쇠비(damping ratio,  $D$ )의

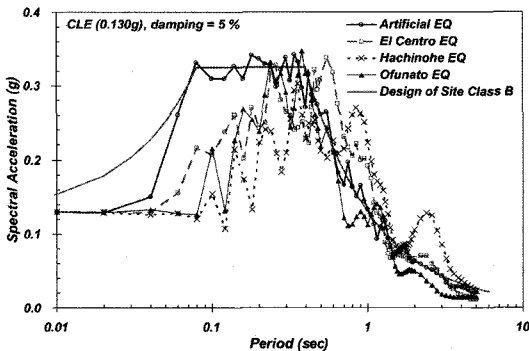


Fig. 4. Acceleration response spectra of input rock-outcrop motions on CLE (0.130 g).

비선형 곡선은 기존 문헌 자료와 국내 내륙 지반에 대해 공진주 시험으로부터 얻은 기존 시험 결과를 활용하였으며(선창국 등, 2005b), 해석 부지의 합리적 지진 응답 특성 평가를 위하여 지층별로 특성화된  $G/G_0$  및 감쇠비 곡선을 Fig. 5에 제시한 바와 같이 입력하였다.

두 지역의 대상 부지에 대한 일차원 등가 선형 지진 응답 해석을 수행한 결과, 부지별로 지층 구성 및  $V_S$  분포와 같은 지반 특성에 따라 암반 노두에 대한 지표면 자유장 가속도의 비로 파악할 수 있는 증폭 정도가 다르게 나타났다. 다양한 지진파 입력을 통한 해석으로부터 결정된 지표면 최대 가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)는 해미 읍성과 사천 읍성 지역에서 CLE의 경우 각각 0.156 g~0.328 g와 0.125 g~0.263 g이었고 OLE의 경우 각각 0.052 g~0.114 g와 0.046 g~0.104 g이었다. 이러한 결과는 암반 노두의 최대가속도를 기준으로

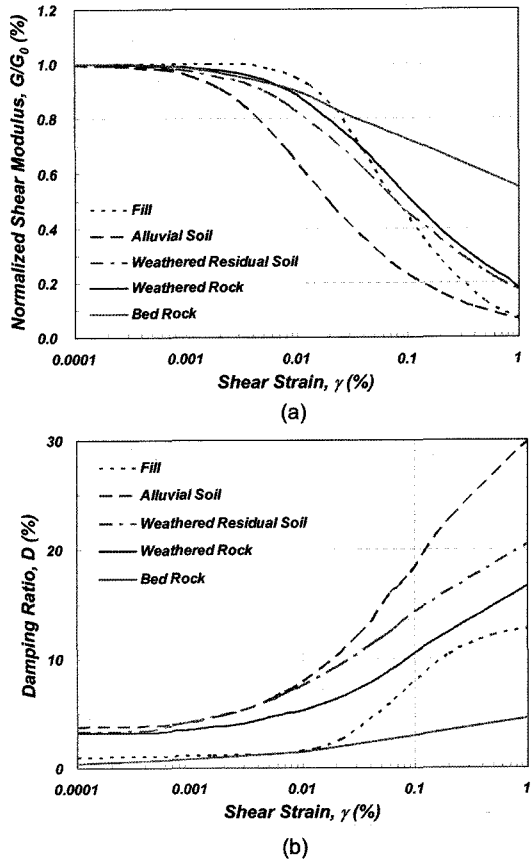


Fig. 5. Normalized shear modulus and damping ratio curves with shear strain: (a) Normalized shear modulus; (b) Damping ratio.



최대 2.5배 및 최소 1.1배의 증폭 정도를 나타낸 것이다. 각 부지에서 내진 성능 수준별 4종류의 지진파 해석 결과들을 평균한 지표면 최대 가속도는 Table 2에 제시한 바와 같다. 또한, Table 3에는 부지별 지반 특성으로서 기반암 심도( $H$ ), 부지 고유주기( $T_G$ ) 그리고 현행 국내 내진 설계 지반 분류 기준인 지하 30m까지의 평균 전단파속도( $V_{S30}$ ) 및 그에 따른 지반 분류도 함께 제시하였다.

읍성은 역사적으로 지역 방어를 위해 축성되어 왔으므로 주로 산지나 구릉지를 끼고 위치해 있음에 따라 일반적인 내륙 평야 지역(선창국 등, 2005a)에 비해 읍성 지역의 기반암은 얇게 분포해 있었다. 특히, 해미 읍성에 비해 사천 읍성의 기반암 심도가 얇았는데, 해미 읍성의 경우 중앙 평지(23.0 m)를 제외하고는 대체로 15 m 내외로 조사되었고 사천 읍성에서는 8~9 m 정도의 기반암 심도 분포를 보였다. 기반암 심도 분포와 결부되어 심도가 얇은 부지의 경우  $T_G$ 는 작고  $V_{S30}$ 은 클 수 있다. 본 연구 대상 읍성 부지의 경우도  $T_G$ 는 약 0.06~0.16초 그리고  $V_{S30}$ 은 약 500~850 m/s로서 Sun *et al.*(2005)이 조사했던 국내 내륙의  $T_G$ (0.1~0.4초) 및  $V_{S30}$ (250~650 m/s) 분포 범위와 비교해 볼 때, 각각 하한 및 상한 부근의 값으로 결정되었다. 이러한  $V_{S30}$ 의 분포 범위에 따라 기존 내륙 부지들이 대부분 C 또는 D 지반으로 분류된 것(선창국 등, 2005a; Sun *et al.*, 2005)과는 달리, 읍성 부지는 현행 지반 분류 체계(Table 1 참조)에 의해 B 또는 C 지반으로 분류되었다. 특히, 대상 부지들의  $T_G$ 의 분포 범위(0.06~0.16초)는 우리나라 일반적인 성벽 고유주기인 0.13초를 포함하는 단주기 특성을 보이고 있다. 이와 같은 부지 고유주기와

성벽 구조물 고유주기의 상응 관계는 지진 발생 시 성벽에서의 공진 가능성을 의미하며, 더불어 성벽 상부에 위치한 성첩의 지진 취약도를 높이는 우리나라 지반-성벽 구조물 시스템의 특성이라고 할 수 있다.

부지의 주기별 지진 응답 특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 입력 지진파에 따른 지표면 가속도 응답 스펙트럼을 확인하였으며, 지진파의 주요 주파수 성분에 따라 동일 부지의 경우도 다소 다른 스펙트럼 형상을 보였다. Fig. 6은 시추 조사와 공내 탄성과 시험이 수행되었고  $V_{S30}$ (Table 3 참조)에 따른 지반 분류 체계(Table 1 참조)에 의해 각각 C와 B로 지반 분류된 해미의 HE Plain 및 사천의 SS Plain 부지 그리고 사천에서 지반 C로 분류된 SMS Hill 부지에 대한 CLE의 지표면 가속도 응답 스펙트럼을 도시한 것이다. 비교 목적으로 부지별 해당 지반 분류의 표준 설계 응답 스펙트럼을 함께 도시하였으며, 부지별 그리고 지역별 해당 지반 분류의 평균 스펙트럼도 제시하였다. 또한, 우리나라 성벽 구조물의 고유주기(0.13초)도 삽입 제시하였다. 지진파별 응답을 Fig. 6에서 살펴보면, 다른 지진에 비해 인공 지진의 가속도 응답이 대상 부지의 고유주기 부근에서 설계 스펙트럼보다 크게 증폭되고 있는 일관된 경향을 보이고 있으며, 이는 Fig. 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 인공 지진의 경우 다른 입력 지진파와는 달리 읍성 부지의 고유주기에 상응하는 고주파수(0.06~0.16초의 주기) 성분이 풍부하기 때문이다. 전체적으로는 지반 분류 C가 증폭이 거의 발생하지 않은 지반 분류 B에 비해 스펙트럼 가속도가 크게 나타났다. 또한, 지반 분류 C의 경우 지반 특성에 따라 지진 응답이 다르게 평가되었는데, 사천 읍성 부지에 비해 대체로  $T_G$

**Table 3.** Site characteristics and average of peak ground acceleration at testing sites.

Site Name	Investigation Method	Bedrock Depth, $H$ (m)	Site Period, $T_G$ (sec)	$V_{S30}$ (m/s)	Site Class	Average of PGA (g)		
						CLE	OLE	
Hemi	HE Plain	B, C, D, S	16.0	0.140	673	C	0.220	0.085
	HN Mt	S	15.0	0.121	567	C	0.247	0.086
	HC Plain	S	23.0	0.161	532	C	0.196	0.067
	HS Plain	S	15.0	0.159	497	C	0.266	0.096
	HW Plain	S	15.0	0.134	594	C	0.218	0.075
Sacheon	SS Plain	B, C, D, S	8.7	0.064	854	B	0.174	0.063
	SMS Hill	S	9.1	0.096	606	C	0.193	0.072
	SMN Mt	S	9.1	0.096	624	C	0.177	0.066
	SN Mt	S	8.0	0.080	763	B	0.160	0.060

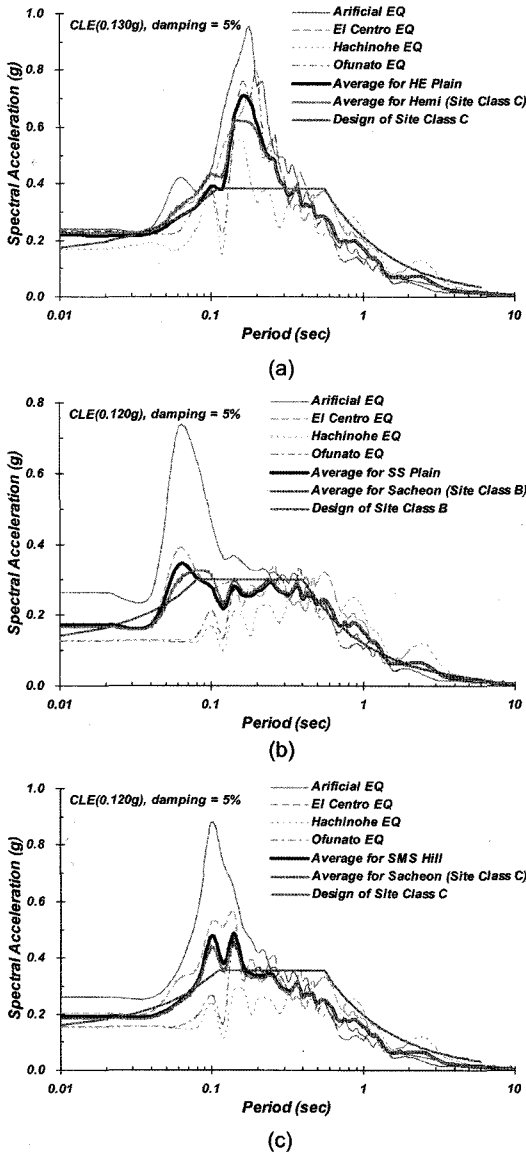


Fig. 6. Response spectra of acceleration on ground surface for CLE at representative testing sites: (a) HE Plain site (site class C); (b) SS Plain site (site class B); (c) SMS Hill site (site class C). Design response spectra for each site class are also illustrated for the purpose of comparisons.

가 크고  $V_{s30}$ 이 작은 해미 읍성 부지(Table 3 참조)의 스펙트럼 가속도가 보다 주기가 긴 영역에서 크게 증폭되었다. 그렇다 할지라도 Fig. 6(a) 및 Fig. 6(c)에 제시된 두 읍성 지역의 지반 분류 C 부지 모두에서 대체로 성벽 고유주기와 유사한 스펙트럼 가속도 증폭 경향을

보였으며, 이러한 부지 응답 해석 결과에 근거해 볼 때 문헌에 기록된 역사 지진 발생 시 성벽 저면에 작용하는 지진 하중에 비해 크게 증폭된 진동이 성첩에 작용했을 것으로 판단된다. 전체적으로는 Fig. 6에 제시된 CLE에서의 지진 응답 특성의 경향은 OLE에서도 거의 일치하였다. 또한, 해석을 통한 가속도 응답 스펙트럼 비교 결과로 볼 때, 부지별 상대적인 응답 특성은 지반 조사로부터 평가된 지반 특성을 통해서도 개략적으로 예측 가능하였다.

### 읍성 지역에 대한 부지 고유 지진 응답 특성의 정량적 분석

대상 부지들에 대한 지진 응답 해석으로부터 결정된 응답 스펙트럼과 설계 스펙트럼의 차이는 상대적으로  $T_G$ 가 크고  $V_{s30}$ 이 작은 해미 읍성 부지(지반 분류 C)에서 컸으며, 이러한 차이는 현행 내진 설계 기준과 해미 읍성 지역과의 국부적 부지 효과 차이로부터 기인한 것이다. 읍성 대상 부지들의  $F_a$ 와  $F_v$ 를 식 (3)과 식 (4)를 토대로 산정하여 부지 효과를 정량적으로 평가하고, 현행 내진 설계 지반 분류 기준으로서의 지반 특성인  $V_{s30}$ 에 따른 크기 분포 관계를 Fig. 7에 도시한 바와 같이 살펴보았다. Fig. 7에는 현행 내진 설계 기준의 CLE(0.130 g) 및 OLE(0.047 g)에서의 지반 분류 B와 C의 지반 증폭계수들도 비교 제시하였다.  $F_a$ 의 경우 Borchardt(1994)에 의해 이미 알려진 바와 같이  $V_{s30}$ 의 증가에 따른 증폭계수의 감소 경향을 확인할 수 있었으나,  $F_v$ 의 경우 그러한 감소 경향은 거의 나타나지 않았다. 지반 분류 B에 해당되는 부지들에서는  $F_a$ 가 다소 크게 나타나긴 하였지만 대체로  $F_a$ 와  $F_v$  모두 1.0 정도의 크기를 보였으며, 이는 현행 설계 기준과 일치하는 값의 분포이다. 반면, 지반 C로 분류된 읍성 부지의 경우 기존 국내 내륙 부지에서와 같이  $F_a$ 는 현행 설계 기준에 비해 크게 그리고  $F_v$ 는 작게 결정되었다(선창국 등, 2005a; Sun *et al.*, 2005). 이러한 증폭계수의 차이는 지반 분류 C의 응답 스펙트럼 비교 결과(Fig. 6(a) 및 6(c))와도 대응되며, 국내 읍성 지역과 현행 내진 설계 기준의 근간인 미국 서부 지역의 부지 고유 지진 응답 특성의 차이로 인한 것이다(Sun *et al.*, 2005). 따라서 국내 부지에서 합리적으로 역사 지진 세기를 결정하거나 내진 설계 및 내진 성능 평가를 수행하기 위해서는 현행 내진 설계 기준(건설교통부, 1997)의 지반 분류에 따른 증폭계수를 단순히 활용하기 보다는 종합적인 지

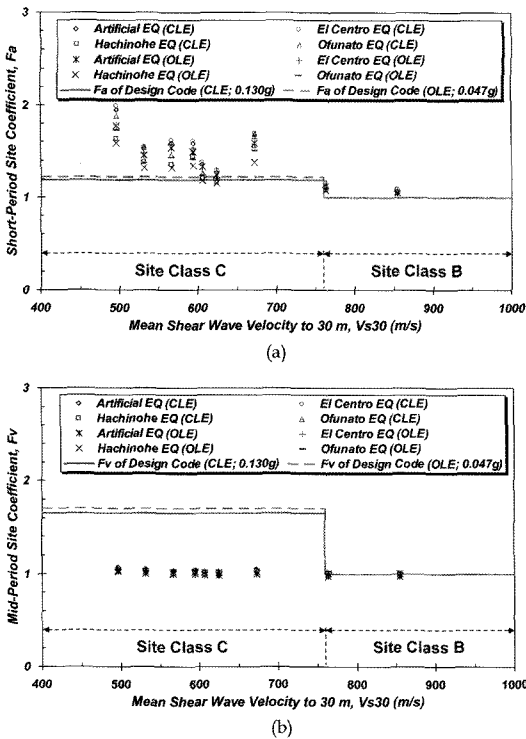


Fig. 7. Site coefficients,  $F_a$  and  $F_v$ , based on the results of analyses with the mean shear wave velocity of the upper 30 m ( $V_{s30}$ ): (a) Short-period site coefficient,  $F_a$ ; (b) Mid-period site coefficient,  $F_v$ .

반 조사에 근거한 부지 응답 해석이 유용할 것으로 판단된다. 또한, 우리나라 지질 조건 및 지반 동적 특성에 따른 지역 고유의 부지 응답 특성을 반영한 지반 분류 체계 및 증폭계수의 체계화 연구가 무엇보다도 우선적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

종합적으로 조사된 지질 조건 및 지반 동적 특성을 근거로 수행된 지진 응답 해석을 통해 평가한 읍성 지역 부지 고유의 지진 응답 특성은 부지 고유주기 (0.06~0.16초) 부근의 단주기 영역에서의 지진 세기의 증폭으로 정의되며, 증폭 크기는 Fig. 7(a)로부터 확인할 수 있는 바와 같이 지진파 및  $V_{s30}$ 에 따라 1.2~2.0 정도의  $F_a$ 로서 정량적인 지표로 제시될 수 있다. 즉, 역사 문헌상의 피해가 발생한 읍성의 토사 부지에서는 주변의 암반 노두에서의 지진 크기에 비해 중장주기 영역과는 달리 단주기 영역에서 1.2~2.0 배 정도의 증폭이 발생할 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 국내 읍성 지역의 부지 고유 지진 응답 특성은 고유주기(약 0.13초)가 작은 성벽 구조물에서 지진시 공진을 발생시킬 수 있다.

역사 지진시 성벽 저면에 작용한 지진동은 단주기 영역에서 이미 암반 노두에 비해 증폭된 상태로 도달한 것이며, 다시 단주기 공진 특성을 보이는 성벽에서 크게 증폭되어 성첩에 진동 하중이 작용했을 것으로 보인다. 따라서 본 연구의 대상 읍성 지역들과 같이 단주기 증폭 가능성이 높은 부지에서는 단주기 고유주기를 갖는 성벽과 그 상부에 존재하는 성첩 구조물의 경우 중장주기 고유주기를 보이는 구조물들에 비해 상대적으로 지진에 따른 피해가 크거나 붕괴가 쉽게 발생했을 것으로 판단된다. 그렇다 할지라도 읍성 지역에서의 성첩 붕괴 사례들에 근거한 보다 정확하고 체계적인 역사 지진 세기 평가를 위해서는 본 연구에서 정량화한 부지 효과를 토대로 지반-성벽-성첩 시스템에 대한 다양하고 종합적 해석 및 모델 시험이 필요할 것으로 판단된다.

### 결론 및 제언

정량적인 역사 지진 피해 사례인 성첩 붕괴 기록이 존재하는 국내의 해미 읍성과 사천 읍성의 두 지역을 대상으로 지진 발생 시의 부지 효과를 정량적으로 평가하고자, 다양한 지반 조사를 수행하여 깊이에 따른 지질 조건 및 지반 동적 특성으로서의 전단파속도( $V_s$ ) 분포를 결정하고, 이를 토대로 대상 지역내 9개소의 부지에 대한 등가선형 지진 응답 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 대상 지역에 대한 지반 조사 결과, 해미 읍성에서는 중앙 평지를 제외하고는 대체로 15m 정도의 기반암 심도를 보였고 사천 읍성에서는 8~9m의 얕은 기반암 심도 분포를 나타냈다. 또한, 현장 탄성과 시험으로부터 결정된 깊이별  $V_s$  분포를 이용하여 산정한 내진 설계 지반 분류 기준인  $V_{s30}$ 의 경우 대상 부지들에서 500~850 m/s의 분포를 나타냈고, 그에 따라 대상 부지들은 지반 분류 C와 B로 구분되었는데 사천 읍성의 2 부지를 제외하고는 대부분 지반 분류 C에 해당되었다. 더불어 부지 고유 지진 응답 지표인 부지 고유주기( $T_G$ )는 0.06~0.16초의 단주기 분포를 보였다.

2) 두 읍성 지역내 9곳의 부지들에서의 지진 응답 해석 결과, 암반 노두의 최대 가속도에 비해 최대 2.5배 그리고 최소 1.1배 정도 증폭된 평균 지표면 최대 가속도를 나타냈다. 또한, 해석을 통한 가속도 응답 스펙트럼으로부터 부지 고유주기 부근의 증폭을 확인하였고, 지반 분류 C에 해당되는 부지들에서는 성벽 구조물 고유주기(0.13초) 부근에서 크게 증폭된 스펙트럴 가속도

를 보였다.

3) 부지 고유 지진 응답의 정량화를 목적으로 해석 결과를 이용한 지표면 대 암반 노두의 가속도 응답 스펙트럼 비를 토대로 산정한 단주기(0.1~0.5초) 증폭계수( $F_0$ )와 증장주기(0.4~2.0초) 증폭계수( $F_1$ )를 산정하여 미국 서부 지역을 근간으로 하는 현행 내진 설계 기준과 비교해 본 결과, 대상 읍성 지역에 대한 현행  $F_0$ 의 과소평가와  $F_1$ 의 과대평가 경향을 확인하였다.

4) 지반 조사 및 지진 응답 해석 결과에 근거한 두 읍성 지역의 부지 고유 지진 응답 특성은 부지 고유주기(0.06~0.16초) 부근의 단주기 영역에서의 지진 세기 증폭으로 정의될 수 있으며, 이러한 특성은 단주기 고유 응답을 보이는 성첩 구조물의 지진 시 공진 가능성 및 그에 따른 성첩 붕괴 가능성을 나타낸다. 그렇다 할지라도 읍성 지역에서의 성첩 붕괴와 같은 사례에 근거한 객관적인 역사 지진 세기 평가를 위해서는 본 연구에서 정량화한 부지 효과를 토대로 지반-성벽-성첩 시스템에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본 사업인 실시간 지진 분석 및 지진해체 정량적 예측 기술 개발' 과제의 지원과 서울대학교 공학연구소의 연구 협조에 의해 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

건설교통부, 1997, 내진 설계 기준 연구(II).  
과학기술부, 2000, 지진세기의 정량적 평가 및 단층운동 해석 연구.  
맹승원, 2001, 성첩 모델의 진동대 실험과 역사 지진의 세기 평가, 석사학위논문, 서울대학교.  
泗川郡, 1899, 泗川邑誌.  
사전문화원, 1989, 泗川訴齋瀟煜.  
선창국, 정충기, 김동수, 2005a, 국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭계수 및 지반 분류 체계 제안, 한국지반공학회 논문집, 21(6), 101-115.  
선창국, 양대성, 정충기, 2005b, 서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가, 한국지진공학회 논문집, 9(4), 29-42.  
신병우, 소철섭, 박봉순, 이상헌, 1989, 해미도폭 지질보

고서(축척 1:50,000), 한국동력자원연구소.  
윤중구, 2006, 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구, 박사학위 논문, 한국과학기술원.  
최유구, 유병화, 1969, 지질도폭 설명서: 사천(1:50,000), 과학기술처 국립지질조사소.  
한국지질자원연구원, 2005, 지진 통합관측망 운영 및 신속 경보 시스템 개발 연구 (부산-경남 지역), 과학기술부.  
Borcherdt, R.D., 1994, Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), *Earthquake Spectra*, 10(4), 617-653.  
BSSC, 1997, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1 - Provisions, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council.  
Dobry, R., Borcherdt, R.D., Crouse, C.B., Idriss, I.M., Joyner, W.B., Martin, G.R., Power, M.S., Rinne, E.E., Seed, R.B., 2000, New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, *Earthquake Spectra*, 16(1), 41-67.  
ICBO, 1997, 1997 Uniform Building Code, Volume 2 - Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials.  
Idriss, I.M., Sun, J.I., 1992, User's Manual for SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, University of California, Davis.  
Kim, D.S., Chung, C.K., Sun, C.G., Bang, E.S., 2002, Site assessment and evaluation of spatial earthquake ground motion of Kyeongju, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(5), 371-387.  
Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D., Abrahamson, N., 1999, Characterization of Site Response General Categories, PEER Report 1999/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.  
Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.  
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., Kim, D.S., Chung, C.K., 2005, Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea, *Engineering Geology*, 81(4), 446-469.

2006년 10월 13일 원고접수, 2007년 1월 10일 게재승인

**선창국**

한국지질자원연구원 지진연구센터  
305-350 대전시 유성구 가정동 30 번지  
TEL: 042-868-3176  
Fax: 042-861-1872  
E-mail: pungsun@kigam.re.kr

**정총기**

서울대학교 지구환경시스템공학부  
151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1 번지  
Tel: 02-880-7347  
Fax: 02-875-6933  
E-mail: geolabs@snu.ac.kr

**김동수**

한국과학기술원 건설및환경공학과  
305-701 대전시 유성구 구성동 373-1 번지  
Tel: 042-869-3619  
Fax: 042-869-3610  
E-mail: dskim@kaist.ac.kr

**김재관**

서울대학교 지구환경시스템공학부  
151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1 번지  
Tel: 02-880-8387  
Fax: 02-887-0349  
E-mail: jkwankim@snu.ac.kr