

서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가

Evaluation of Site-Specific Seismic Amplification Characteristics in Plains of Seoul Metropolitan Area

선창국*
Sun, Chang-Guk

양대성**
Yang, Dae-Sung

정충기***
Chung, Choong-Ki

국문요약

서울의 두 평야 지역 4km×4km에 대한 부지 고유의 지진 응답 특성 평가를 위하여 대상 지역내 총 350 개의 시추 자료를 활용하였다. 국내 내륙 지역의 공내 탄성파 시험의 자료와 시추 자료를 이용하여 N-V_s 상관관계를 도출하고, 이를 토대로 선정된 350 시추 위치에서의 깊이별 전단파 속도(V_s) 분포를 결정하여 등가선형 기법의 부지 응답 해석을 수행하였다. 현행 지반 분류 기준인 심도 30 m까지의 평균 V_s (V_{s30})는 대상 지역 내에서 250~550 m/s의 분포를 보였고, 그에 따라 대부분의 부지가 지반 분류 C와 D로 분류되었다. 서울 평야 지역의 부지 고유 주기는 국내 지반 증폭 계수의 구간인 미국 서부 지역에 비해 매우 작은 0.1~0.4초의 분포를 보였다. 비록 몇몇 부지에서 토사 층 내에 연약한 지층이 존재함에 따라 기저 고립 효과가 발생하여 현행 단주기 증폭 계수가 지반 운동을 과대평가하기도 하지만, 미국 서부 지역과의 지반 조건 차이로 인해 전반적으로 서울 평야 지역에서는 현행 국내 내진 설계 기준의 단주기(0.1~0.5초) 증폭 계수(F_a)는 지반 운동을 과소평가하고 증장주기(0.4~2.0초) 증폭 계수(F_v)는 지반 운동을 과대평가하고 있다.

주요어 : 지반증폭계수, 부지응답해석, 응답스펙트럼, 전단파속도, 부지고유주기, 기저고립효과

ABSTRACT

Total 350 borehole profiles were selected from the database of borehole logs in Seoul, for the site-specific seismic evaluation at two 4km×4km plain areas. Equivalent-linear site response analyses for the selected 350 sites were conducted based on shear wave velocity (V_s) profiles, which were determined from the N-V_s correlation established using borehole seismic testing results in the inland areas of Korea. Most sites were categorized as site classes C and D based on the mean V_s to 30 m in depth (V_{s30}) ranging from 250 to 550 m/s. The site periods of the plains in Seoul ranging between 0.1 and 0.4 sec were significantly lower than those of the western US, from which the site coefficients in Korea were derived. For plains in Seoul, the site coefficients, F_a's and F_v's specified in the Korean seismic design guide, underestimate the ground motion in short-period (0.1-0.5 sec) band and overestimate the ground motion in mid-period (0.4-2.0 sec) band, respectively, because of the differences in the geotechnical conditions between Seoul and the western US, although the F_a's in several sites overestimate the motion due to the base isolation effect resulted from the soft layer in soil deposit.

Key words : site coefficients, site response analysis, response spectrum, shear wave velocity, site period, base isolation effect

1. 서론

최근 전 세계적으로 수많은 지진이 대도시나 그 주변에서 발생해 왔으며, 그에 따른 인명과 재산의 피해는 상상을 초월할 정도이다. 특히, 이러한 지진 재해 분포 경향은 지역에 따른 주거나 산업의 밀집도와 더불어 지반의 지진 민감도에 따른 부지 효과와 직접 관련이 있다. 부지 효과는 국부적 지질 조건 및 지반 동적 특성과 연관되며, 이로 인해 지진시 특정 지역의 지반 운동이 주변에 비해 크게 증폭되어 나타날 수 있다. 또한, 부지 효과는 근거리 발생 지진 뿐만 아니라 원거리 발생 지진으로 인한 지역적 재해의 영향 요소로도 작용할 수 있으며, 그 대표적인 사례가 1985년 Mexico City의 지진 피해 사례이다. 1985년 Mexico 서부 태평양 해안의 Michoacan (M_s=

8.1)에서 발생한 지진은 전파 과정 중에 지진파의 단주기는 감쇠되고 증장주기는 잔류하게 됨에 따라 무려 350 km나 떨어진 Mexico City의 점토 지반에서 저주파가 증폭되어 증장주기 구조물에 큰 피해를 발생시킨 바 있다.⁽¹⁾ 따라서 연약 지반의 저주파 증폭이 증장주기 구조물의 공진 응답을 유발시켜 큰 피해를 초래하는 것과 같이, 고주파 증폭은 단주기 구조물의 피해를 유발시킬 수 있다. 즉, 진앙으로부터 동일한 거리에 있는 부지라도 구성 지반 특성에 따라 지표면 지진파의 크기와 주파수 성분은 다르게 나타날 수 있다.

일반적으로 지진 하중은 단단한 매질인 기반암에서 보다 상대적으로 연약한 매질인 상부의 토사 층에서 크게 증폭되므로, 지진 피해 정도는 지진의 규모 뿐만 아니라 부지 고유의 지반 특성에 의해서도 좌우된다. 이와 같은 지진 피해에 대한 지반 영향의 중요성을 인식하게 되면서 해외에서는 최근 수십년에 걸쳐 주로 강진 지역을 대상으로 경험적 방법과 해석적 방법을 통해 지반의 증폭 특성을 평가하고 정량화를 위한 증폭 계수를 제시해 왔으며, 이를 토대로 내진 설계, 성능 평가, 그리고 성능 개선에 관

* 정희원 · 한국도로공사 도로교통기술원, 박사후연수자
(대표저자: pungsun@snu.ac.kr)

** 대한건설사립지반공학부, 사원

*** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 5. 2 / 심사종료일 : 2005. 7. 7)

한 체계적 연구가 진행되어 오고 있다. 그러나 국내의 경우 지진 계측이 비교적 최근에 활성화됨에 따라 분석 활용 가능한 계측 기록이 거의 전무하며, 해석적 연구 또한 근래에 본격적으로 진행되고 있는 실정이다. 또한, 1997년 내진 설계 기준의 제정 당시 필수적 사전 검토 과정인 우리나라 지반 특성에 따른 증폭 특성의 정량적 평가 없이, 국가적 내진 대책의 조속한 체계화를 위해 해외 강진 지역인 미국 서부의 지역적 지진 응답 연구 자료에 따라 작성된 UBC(Uniform Building Code)의 지반 조건별 증폭 계수를 준용하게 되었다.⁽²⁾ 이로 인해 국내에서의 내진 설계 및 내진 성능 평가에 활용되는 지반 증폭 계수는 지반 및 지진공학적 여러 조건에 따라 과대 또는 과소하게 적용될 수 있다.

설계 지반 운동의 결정 변수인 증폭 계수는 지반 조건별로 구분된 지반 분류 체계를 통해서 설계 기준화 되어 있으며, 지반 및 구조물의 응답 특성을 반영하기 위하여 단주기와 중장주기의 계수로 이원화 되어 있다. 현행 내진 설계 기준의 지반 조건은 동적 특성인 전단파 속도(shear wave velocity, V_s)를 토대로 설정된 정량화된 기준 변수로서 지하 30 m까지의 평균 전단파 속도(V_{s30})에 따라 구분되고, 이는 대상 부지의 국부적 지반 특성을 증폭 계수 결정을 위한 매개 변수로 반영한 것으로서 국내의 특성 이라기보다는 미국 서부 지역(Western US, WUS)의 특성이라고 할 수 있다. 따라서 국내 고유의 상황에 적합하게 내진 설계 지반 운동을 합리적으로 결정하기 위해서는 국내 지반 고유의 지진 응답 특성에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 정량적 분석이 가능한 지진 계측 자료가 부족한 국내 지역의 지진 증폭 특성을 평가하기 위하여 산업과 주거가 밀집됨에 따라 막대한 지진 피해가 발생할 가능성이 있는 대도시 서울 내의 평야 지역을 대상으로 부지 고유의 응답 특성을 해석적 방법을 통해 평가하였다. 또한, 해석 결과를 토대로 구한 국내 대상 지역 고유의 증폭 계수를 현행 내진 설계 기준의 증폭 계수와 비교하고, 증폭 계수 간 차이에 대한 원인을 분석하였다.

2. 국내 내진 설계의 부지 효과별 지반 증폭 계수

인류의 활동이 주로 이루어지는 지역적 부지에서의 지반 운동은 지진 발생원(seismic source)인 단층의 특성에 따른 진원 효과(source effect), 진원부터 인류 활동 부지까지의 광역적 전달 매체의 특성에 따른 경로 효과(path effect), 그리고 인류 활동과 구조물이 집중된 부지에서의 국부적 지반 특성에 따른 부지 효과(site effects)에 의해 결정된다. 진원에서의 단층 활동 특성에 따라 고유한 형태로 발생한 지진파는 일반적으로 거리에 따라 감쇠되어 그 발생 에너지의 크기가 작아지게 되며, 이와 같이 변형된 지진파인 지표면의 지진동이 인간에게 지진 피해를 유발시킨다. 인간이 실질적으로 체험하는 지표면 부근 지진

동의 크기 및 형태는 진원이나 진앙으로부터 동일 거리의 부지들 일지라도 해당 부지 기반암까지의 전파 경로뿐만 아니라 부지 효과와 관련된 기반암부터 지표면까지 구성 토사의 동역학적 특성과 관련된 응답 거동에 따라 크게 달라질 수 있다. 지진시 지반의 응답 특성은 주기(주파수)별 가속도(acceleration)나 속도(velocity)로 표출되는 지진동의 크기 거동을 의미하며, 지표면 부근 구조물의 동적 응답에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이러한 지진시 각 부지의 응답 특성은 지반의 지질 및 동적 특성에 따라 발생 지진의 재현 주기별로 정량화된 단주기(short-period)와 중장주기(mid- 또는 long-period)의 지진 계수(Seismic Coefficients)인 C_a 와 C_v 의 형태로 현행 국내 내진 설계 기준에 반영되어 있다.⁽³⁾ 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 계수, C_a 및 C_v 는 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 증폭 계수(Site Coefficients 또는 Site Amplification Factors), F_a 및 F_v 의 곱의 형태인 식 (1) 및 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.⁽¹⁾

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

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

지반의 증폭 계수는 기반암 노두 대 지표면에서의 상대적인 지반 운동 크기 비율을 의미하며, 지반 운동의 구조물 주기(T)별 응답 스펙트럼(Response Spectrum, RS)이나 푸리에 스펙트럼(Fourier Spectrum, FS)을 이용하여 결정할 수 있다.⁽⁵⁾ 식 (3)과 식 (4)는 각각 응답 스펙트럼 기반의 단주기와 중장주기 증폭 계수를 결정하기 위한 관계식으로서, 적분 대상을 통칭하여 기반암 노두 대 지표면의 응답 스펙트럼 비(Ratio of Response Spectra, RRS)라고 하며, 푸리에 스펙트럼이 적용될 경우 푸리에 스펙트럼 비(Ratio of Fourier Spectra, RFS)로 표현할 수 있다.

$$F_a = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (3)$$

$$F_v = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (4)$$

여기서, R_{soil} 과 R_{rock} 은 각각 진원부터 지표면과 기반암 노두까지의 거리

본 연구에서도 위의 식 (3) 및 식 (4)에서와 같이 해석을 통한 응답 스펙트럼을 이용하여 증폭 계수를 산정하였고, 이 과정에서 진원으로부터 대상 부지는 매우 멀리 이격되어 있는 것으로 보고, R_{soil}/R_{rock} 의 값은 1(unit)로 가정하였다.

현행 국내 내진 설계 기준에서는 50년, 100년, 200년,

500년, 1000년, 그리고 2400년의 6단계 지진 재현 주기 별로 보통암 지반(Rock, 지반 분류 B)에 대한 재해도가 작성되어 있으므로 고려 대상 지진의 재해도를 토대로 직접 압반 노두 지반에 대한 지역 계수를 결정하거나, 행정 구역별로 500년 재현 주기의 지진을 기준으로 권역화 되어 있는 지역 계수와 위험도 계수(Hazard Factor, I)의 곱을 통해 발생 가능 지진별 보통암 지반의 지역 계수를 결정할 수 있다. 결정된 지역 계수는 지반 분류 B(보통암)에 대한 지진 계수를 의미하게 되므로, 해당 부지의 지질 및 지반 특성에 따라 정량화된 5 종류(A~E 또는 S_A ~ S_E)의 지반 분류를 적용하여 해당 부지의 지진 계수를 최종적으로 결정하게 된다. 또한, 지반 특성이 지진공학적으로 매우 불리할 경우 추가적인 부지 특성 평가가 요구되는 F (또는 S_F)로 구분할 수도 있다. 이러한 지진 증폭 크기에 따른 국내 지반 분류는 1989년 Loma Prieta 지진 계측 기록의 고찰을 토대로 Borchardt(1994)가 제안한 지표면부터 지하 30 m(100 ft 또는 30.48 m)까지의 평균 전단파 속도(V_{S30} 또는 \bar{V}_S)별 지반 분류 방안을 토대로 제정한 ICBO(1997)의 UBC(Uniform Building Code)를 직접 준용한 것이다. V_{S30} 은 식 (5)와 같이 산정할 수 있고, 표 1은 500년 재현 주기의 발생 가능 지진에 대해 권역화된 국내의 지진 구역 I($Z=0.11$)과 II($Z=0.07$)를 대상으로 하는 현행 내진 설계 기준의 부지 효과에 따른 지반 조건별 지반 증폭 계수이다. 본 연구 대상 지역인 서울은 행정 구역별로 권역화된 지역적 구분에 따라 발생 가능 지진 위험도가 높은 지진 구역 I에 해당된다.

$$V_{S30} = 30 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{Si}} \quad (5)$$

여기서, d_i 와 V_{Si} 는 각각 지하 30m까지의 i 번째 지층의 두께와 평균 전단파 속도(V_S)

이처럼 국내 내진 설계 기준의 설계 응답 스펙트럼 결정을 위한 지진 계수는 지진학적 고찰을 통한 한반도 역사 지진 기록을 토대로 설정한 국내의 지역 계수와 미국 서부 지역의 지반 분류에 따른 지반 증폭 계수의 조합으로 구성되어 있다. 즉, 국내 고유의 지역 계수와 지진 발

생 및 지층 형성의 조건이 국내와는 다른 미국 서부의 지역적 지반 특성이 반영된 증폭 계수 간의 부적절한 조합을 통한 지진 계수를 적용하여 국내 설계 지반 운동이 결정되고 있다.

3. 서울 평야 지역에서의 등가선형 지반 응답 해석

현행 국내 내진 설계 기준의 지진 계수에 내제된 지반 증폭 계수는 California와 같은 미국 서부 강진 지역의 지반 응답 특성을 반영한 1997년 NEHRP(National Earthquake Hazards Reduction Program) 제안 규정 및 1997년 UBC의 증폭 계수를 준용하고 있다.⁽¹⁾ 미국 서부 지역에서의 내진 설계를 위한 지반 증폭 계수의 정량적 체계화는 1989년 Loma Prieta 지진 계측 자료뿐만 아니라 일차원 부지 응답 해석 결과의 병용을 통해 이루어 졌으며⁽⁷⁾, Borchardt⁽⁸⁾는 이렇게 정량화된 NEHRP의 부지 증폭 계수를 1994년 Northridge 지진의 계측 부지에 대한 증폭 정도와 비교 및 검증함으로써 미국 서부 지역 지반에 대한 증폭 계수로서의 합리성을 확인한 바 있다. 본 연구에서는 활용 가능한 계측 지진 기록이 거의 전무한 서울 지역에 대한 부지 증폭 특성의 정량적 평가를 위하여 미국 서부 지역에 대한 기존 방법중 수치 해석적 기법으로서 활용된 일차원 등가선형(equivalent-linear) 지반 응답 해석을 수행하였다.

3.1 일차원 등가선형 지반 응답 해석

지반 운동 평가를 위한 부지 효과(site effects)는 지진 및 지반공학적 측면에서 해외에서는 매우 중요하게 다루어져 왔으며, 주요 효과인 기반암 상부 지표 부근 지질 효과(geologic effect)와 더불어 지표나 지하 지형 변화에 따라 제한적으로 나타나는 지표 지형 효과(topographic effect) 및 분지 효과(basin effect)로 구성된다. 본 연구에서는 국내 주요 지역에 대한 부지 효과의 종합적 평가의 일환으로, 우선 지진 발생시 그 피해가 집중될 수 있는 대도시 서울 지역을 대상으로 부지 효과의 가장 지배적인 영향 인자인 기반암 상부 지질 효과에 따른 지반 증폭 평가

표 1 국내 내진 설계의 부지 효과에 따른 지반 증폭 계수

Site Class			Short-Period				Mid-Period			
Symbol	Description	Criterion, V_{S30} (m/s)	$Z=0.11$		$Z=0.07$		$Z=0.11$		$Z=0.07$	
			C_a	F_a	C_a	F_a	C_v	F_v	C_v	F_v
A (S_A)	Hard Rock	$1,500 < V_{S30}$	0.09	0.82	0.05	0.71	0.09	0.82	0.05	0.71
B (S_B)	Rock	$760 < V_{S30} \leq 1,500$	0.11	1.00	0.07	1.00	0.11	1.00	0.07	1.00
C (S_C)	Very Dense Soil and Soft Rock	$360 < V_{S30} \leq 760$	0.13	1.18	0.08	1.14	0.18	1.64	0.11	1.57
D (S_D)	Stiff Soil	$180 < V_{S30} \leq 360$	0.16	1.45	0.11	1.57	0.23	2.09	0.16	2.29
E (S_E)	Soft Soil	$V_{S30} \leq 180$	0.22	2.00	0.17	2.43	0.37	3.36	0.23	3.29
F (S_F)	Requires site specific evaluation		-	-	-	-	-	-	-	-

를 위하여 대상 지역 내의 시추 조사 부지들에 대한 부지 고유의 응답 해석을 실시하였다. 각 부지별 응답 해석은 국내외에서 보편적으로 활용되어 온 SHAKE91⁽⁹⁾을 이용하였으며, 반무한 수평 다층 지반을 수직으로 전파하는 전단파(shear wave)를 대상으로 일차원 등가선형 기법을 적용하여 수행하였다. 해석시 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.

일차원 등가선형 지반 응답 해석은 지층을 통과하는 지진파의 증폭을 분석하기 위하여 파의 각 주파수 성분에 대한 진폭을 계산한 전달 함수(transfer function)를 이용한다.⁽¹⁰⁾ 전체 토층이 여러 개의 지층으로 구성되어 있고 각 층에서의 강성은 일정하다고 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.

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

여기서, ω 는 전달 지진파의 주파수이며, V_s^* 와 α_z^* 는 각각 감쇠비를 갖는 복소수 형태의 토사에서의 전단파 속도 (V_s)와 토사 대 기반암의 임피던스(impedance) 비이다. 식 (6)에서 전달 함수의 공진 주파수에 영향을 주는 요소는 토사의 전단파속도와 토층 두께(H)이며, 증폭 크기는 공진 주파수 영향 요소들과 더불어 감쇠비 및 토층 대 기반암의 임피던스 비에 따라 좌우된다. 특히 기반암의 강성(전단파 속도)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 고유 주기(site period, $T_G = 4H/V_s$)를 산정하여 부지의 응답 특성을 간편하게 예측할 수 있다. 이처럼 간편하게 결정한 부지의 고유 주기는 일차원 등가선형 지진 응답 해석의 전달함수로부터 확인되는 공진 주기와 거의 일치하는 경향을 보인다.⁽²⁾ 또한, 지반의 고유 주기(T_G)는 각 부지의 기반암까지의 지층 두께와 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.

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

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

3.2 대상 평야 지역의 선정 및 응답 해석 조건

본 연구에서는 수평 지층을 가정한 일차원 지반 응답 해석으로 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 대상 지역을 평야로 한정하고, 더불어 대도시 지역에 대한 지진 재해 대책으로서의 해석 결과 활용성을 고려하여 주거 및 산업 시설이 밀집된 서울 시계 내 두 곳의 평야 지역을 선정하였다. 서울의 지형 및 도시 발달 사항을 우선적으로 파악하기 위하여 그림 1에서 제시한 바와 같이 GIS(Geographic Information System) 기법을 활용한 수치 지형도(digital topographic map) 기반의 원격 탐사(remote sensing) 자료 분석 및 지형 분석(terrain analysis)을 실시하였으며, 산지와 하천 사이에 분포하고 지표 지형 변화가 거의 없는 4km×4km의 두 평야 지역(그림 1의 A 및 B 지역)을 지진 응답 해석 대상 지역으로 결정하였다. 특히, 지형 변화의

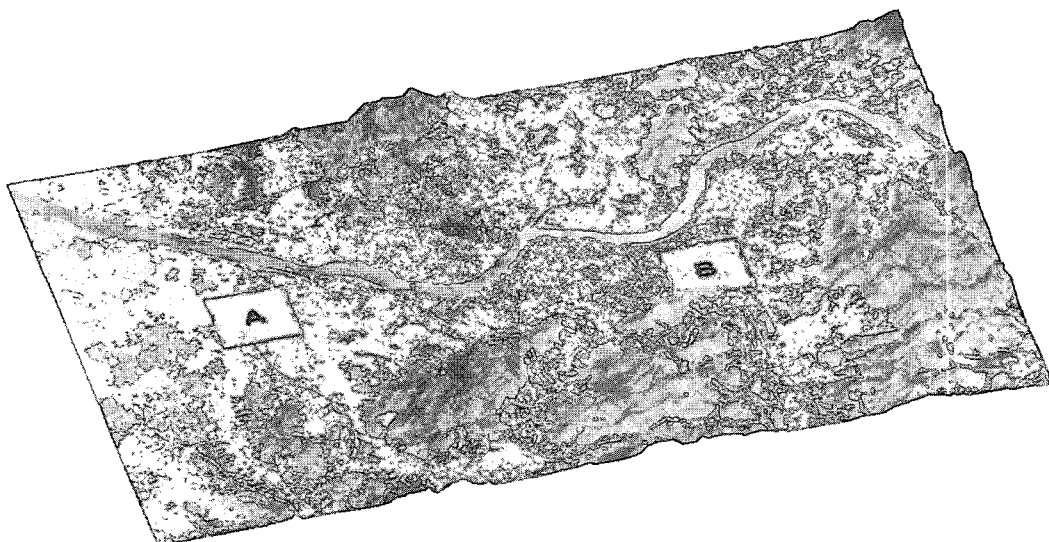


그림 1 서울의 지형 분석을 통한 대상 평야 지역(지표 방향 3배 과장)

정량적 지표인 지형 변화 지수(Index for topographical variation, I_T)를 이용하여 두 지역의 평탄성을 확인한 결과, A 지역은 3450 그리고 B 지역은 6400의 비교적 큰 지수를 보임에 따라 서울 지역에 분포하는 일반적인 평야 지로 확인되었다.⁽¹¹⁾

선정된 서울의 A 지역과 B 지역 내에서의 지반 응답 해석은 도시 개발 중에 수행된 기존 시추 조사 자료를 수집하여 실시하였다. 그림 2는 대상 평야 지역을 포함한 서울에 분포하는 기존 시추 부지의 위치 정보로서, 각 시추 부지에서는 깊이별 지층 구성과 표준 관입 시험(Standard Penetration Test, SPT)의 N 값 및 암반 상태를 확인할 수 있다. 서울 지역의 시추 조사 자료는 지속적인 지반 및 지진공학적 활용을 위하여 데이터베이스(database)로 구축하였으며, 본 연구에서는 구축된 데이터베이스중 대상 평야 지역의 시추 조사 정보만을 지반 응답 해석 목적에 적합하도록 재가공하여 이용하였다. 서울 평야 지역의 지반 증폭 특성 평가를 위한 지진 응답 해석은 그림 2의 우측 삽입 그림에 제시된 바와 같이 A 지역 내 198 부지와 B 지역의 152 부지를 포함하는 총 350 곳의 부지에 대해서 수행하였다. 대상 부지 지층 정보의 종합 분석 결과, 기반암 심도가 최대 30m 정도인 B 지역에 비해 A 지역의 경우 기반암 심도가 최대 50m 정도로 더욱 깊고 퇴적도가 두껍게 발달해 있었다. 이러한 두 대상 지역간 지층 분포 특성의 차이는 B 지역과는 달리 A 지역을 가로 지르는 하천의 과거 퇴적 작용으로 인한 것이다. 또한, 두 지역 모두 하천 지형 부근에서의 지층 발달 특성에 따라 대상 영역 내에서 한강에 가까운 방향(A 지역은 북동 방향, B 지역은 북서 방향)으로 갈수록 퇴적도가 두껍게 발달하는 뚜렷한 경향을 보였다.

대상 부지에 대한 지반 조사는 동적 특성 획득을 위한 현장 탄성과 시험이나 실내 공진주 시험의 수행 없이 시추

조사와 표준 관입 시험만이 실시되었다. 이에 따라 표준 관입 시험의 N 값을 토대로 부지별 지진 응답 해석의 기본 입력 정보인 깊이별 전단파 속도(V_s) 분포를 결정하기 위한 N 값과 V_s 의 상관관계를 도출하고자, 본 연구에서는 다양한 국내 내륙 부지의 공내 탄성과 시험(borehole seismic tests) 결과와 해당 시험 부지의 N 값을 기존 문헌^{(1),(12)}으로부터 수집하였다. 수집된 V_s 와 N 값을 토대로 서울 대상 평야 지역의 시추 위치에서의 V_s 입력 정보 결정을 위한 N - V_s 상관관계를 식 (8)과 같이 도출하였다. 상관관계 도출을 위한 N 값은 실무적 활용성을 고려하여 보정 없이 현장에서 실측된 값을 이용하였다. V_s 와 N 값의 상관관계는 그림 3에 제시한 바와 같이 크로스홀, 다운홀, 업홀 및 부유식 PS 검층 시험과 같은 공내 탄성과 시험의 결과를 종합적으로 이용하여 도출하였고, 기존의 여러 상관관계⁽¹³⁾⁻⁽¹⁶⁾와 전체적으로는 다소 차이를 보였으나 일반적인 토사에 해당되는 10~50 정도의 N 값 범위에서는 유사하게 나타났다. 풍화암이나 단단한 풍화 잔류토와 같이 N 값이 50 이상인 지층에서는 선형 증가 조건으로 가정하여 30cm 관입에 대한 N 값으로 환산하여 이용하였다. 국내 지층 조건에서는 풍화암 하부의 연암 및 그 하부 암반이 대체로 전단파 속도가 750m/s 보다 크므로 기반암에 해당하고 풍화암에 인접한 연암 상부의 전단파 속도는 일반적으로 1,000m/s 정도라고 Sun⁽¹⁾에 의해 제시된 바 있다. 이에 따라 본 연구에서는 서울 지역의 연암이나 그 이상의 경질 암반을 기반암으로 간주하고 전단파 속도를 1,000m/s로 가정하여 해석을 수행하였다.

$$V_s = 65.55 N^{0.40} \tag{8}$$

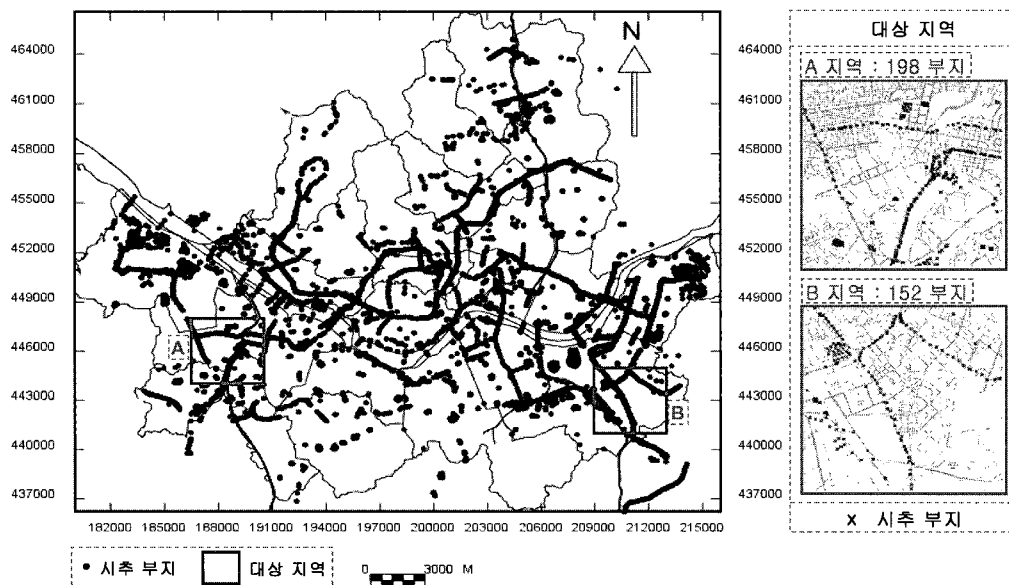


그림 2 서울 및 대상 평야 지역의 시추 조사 부지 위치

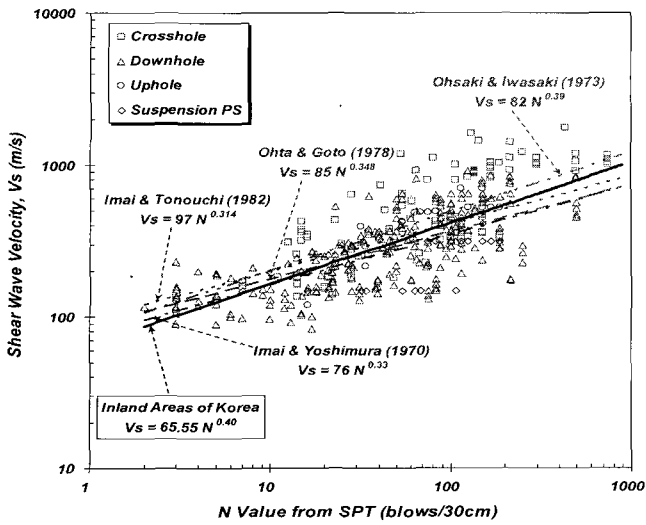
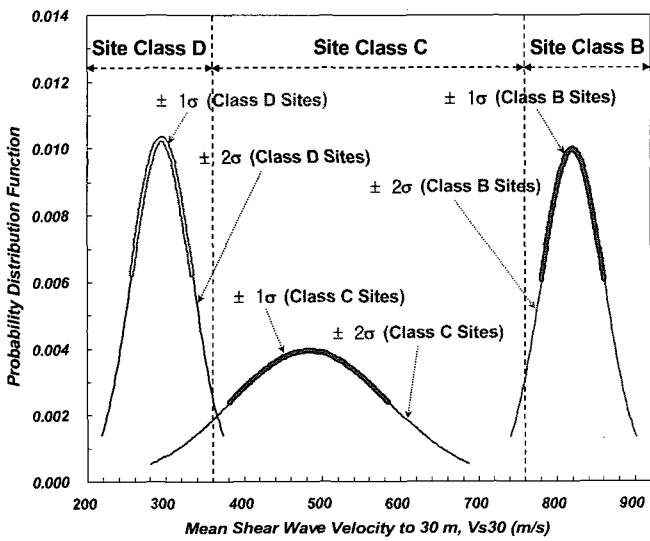
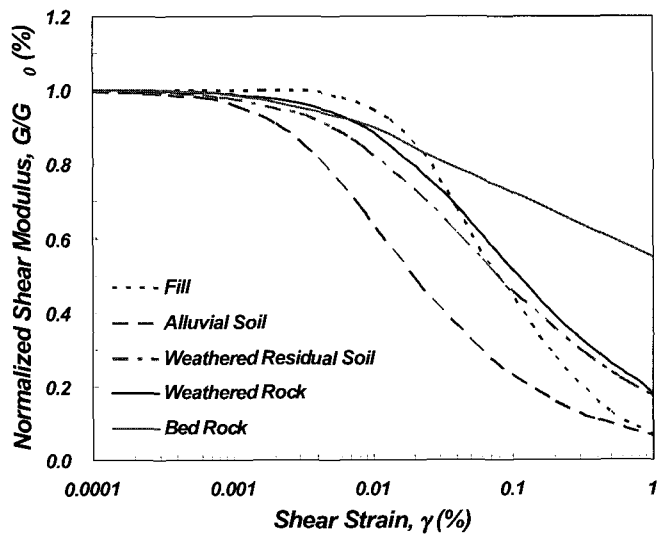


그림 3 국내 내륙 지역에 대한 전단파 속도와 N 값의 상관관계

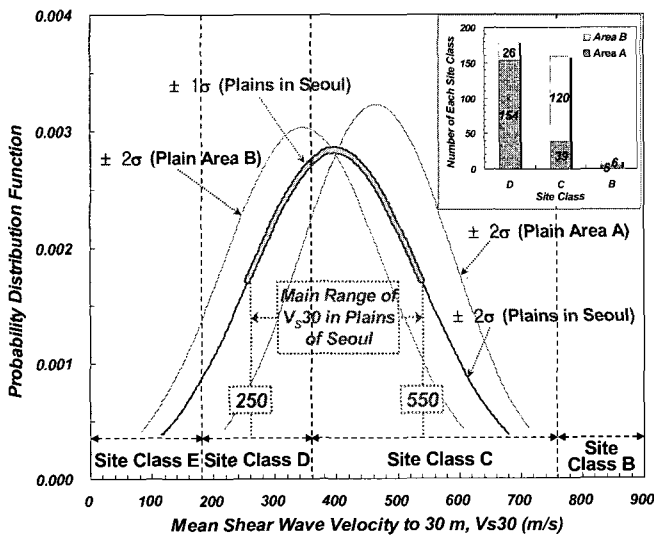
대상 지역 내 모든 부지에 대해 N 값을 토대로 깊이별 전단파 속도와 속도 주상을 결정한 후, 현행 내진 설계 기준의 지반 증폭 계수 결정을 위한 지반 분류 매개 변수인 지표면 아래 30m 까지의 평균 전단파 속도(V_{s30})를 식 (5)에 따라 산정하였다. V_{s30} 을 이용하여 두 대상 지역의 부지들에 대한 지반 분류를 실시한 결과, A 지역 내 부지는 주로 지반 분류 D(D 지반 154 부지, C 지반 39 부지, B 지반 5 부지)에 해당되었으나, B 지역 내 부지는 지반 분류 C(C 지반 120 부지, D 지반 26 부지, B 지반 6 부지)가 주류를 이루었다. 이와 같은 지역별 지반 분류 조건의 편향 특성은 앞서 언급한 지역별 기반암 심도 및 지층 분포 특성과 일치하는 경향이다. 즉, A 지역에서는 풍화 지층에 비해 연약한 퇴적토가 두껍게 발달하고 기반암 심도가 B 지역에 비해 깊게 분포하므로, 지반 분류 C보다 강성이 작고 지진 증폭이 더 클 것으로 간주되는 D



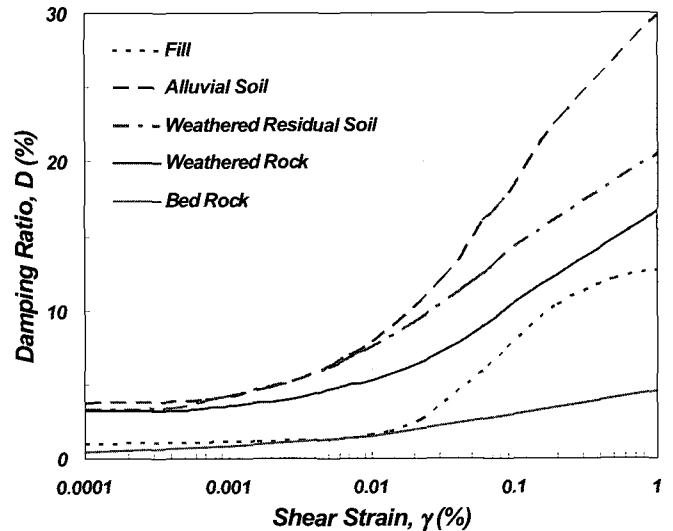
(a) 지반 분류별 V_{s30} 분포



(a) 정규화 전단탄성계수



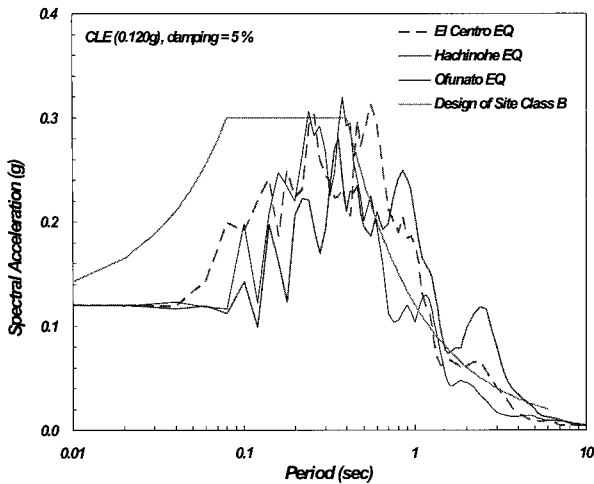
(b) 대상 지역별 및 전체적인 V_{s30} 분포



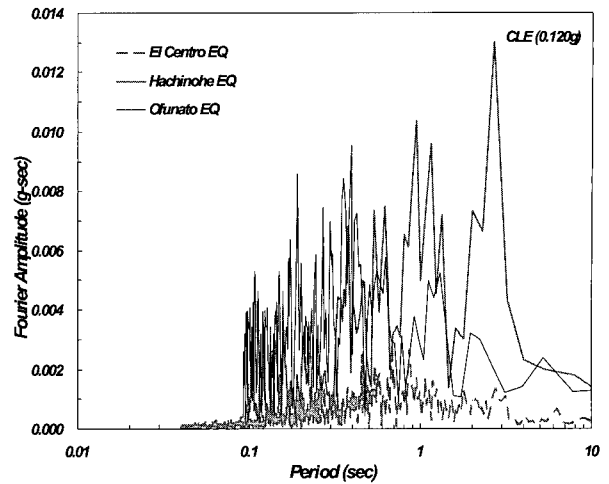
(b) 감쇠비

그림 4 서울 대상 평야 지역에 대한 V_{s30} 의 정규 분포

그림 5 해석을 위한 지반의 비선형 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비(Sun, 2004)



(a) 가속도 응답 스펙트럼



(b) 푸리에 스펙트럼

그림 6 입력 지진의 암반 노두에 대한 가속도 응답 및 푸리에 스펙트럼(붕괴 방지 수준)

지반으로 분류되는 부지의 빈도가 높게 나타났다. 그림 4는 서울의 두 대상 평야 지역 내 부지들의 V_{s30} 에 대한 $\pm 1\sigma$ (표준 편차)와 $\pm 2\sigma$ 구간의 통계 분포로서, 지반 분류별 분포는 그림 4(a)에 제시하였고, 지역별 및 종합적인 분포는 그림 4(b)에서 확인할 수 있다. 또한, 지역과 지반 분류 조건별 부지 개수(그림 4(b)의 삽입 그림)도 확인할 수 있다. 지반 분류 B와 D에 해당되는 부지들은 지반 분류 C의 부지들과는 달리 비교적 좁은 V_{s30} 분포로 밀집되어 있으며, 대체로 지반 분류 C에 가까운 경계측으로 치우쳐 분포하고 있다(그림 4(a)). 서울 평야 지역의 V_{s30} 은 자료의 68% 영역에 해당되는 $\pm 1\sigma$ 구간에서 지반 분류 C와 D의 경계($V_{s30}=360$ m/s) 부근에 좁게 밀집된 250~550m/s의 분포를 보였으며(그림 4(b)), 이러한 분포 범위는 Sun⁽¹⁾이 제시한 주요 국내 내륙 지역들의 V_{s30} 분포인 250~650m/s 내에 포함된다.

깊이별 전단파 속도와 더불어 등가선형 해석시 요구되는 전단변형률에 따른 지반의 정규화 전단탄성계수(normalized shear modulus, G/G_0) 및 감쇠비(damping ratio, D)의 비선형 곡선은 기존 문헌 자료와 국내 내륙 지반에 대해 공진주 시험으로부터 얻은 기존 시험 결과(Sun, 2004)를 활용하였다. 각 부지에서의 등가선형 지반 응답 해석을 위해 지층은 매립토(Fill), 퇴적토(Alluvial Soil), 풍화 잔류토(Weathered Residual Soil), 풍화암(Weathered Rock), 그리고 기반암(Bed Rock)의 총 5 종류로 구분하였으며, 지층별 지반의 비선형 G/G_0 와 감쇠비 곡선은 그림 5와 같다.

대상 지역 내 일차원 시추 부지에서의 해석은 건설교통부 내진 설계 기준의 I 등급 구조물의 붕괴 방지 수준(Collapse Level of Earthquake, CLE)과 기능 수행 수준(Operation Level of Earthquake, OLE)에 대한 서울 지역의 보통암(지반 분류 B) 노두 가속도 수준을 각각 1000년과 100년 재현 주기로 구분한 지진재해도로부터 0.120g와 0.042g로 결정하고, 모든 부지에서 두 수준의 해석을 모두 수

행하였다.

그림 6은 입력 지진들의 붕괴 방지 수준에 대한 암반 노두의 가속도 응답 스펙트럼과 푸리에(Fourier) 스펙트럼으로서, 그림 6(a)에는 보통암 지반인 지반 분류 B의 표준 설계 응답 스펙트럼도 함께 도시하였다. 해석시 발생 지진에 대한 다양한 주파수 특성을 반영하기 위하여 그림 6(b)에서 확인할 수 있는 바와 같이 내륙에서 발생하고 주파수 성분이 다양한 El Centro 지진, 장주기 성분이 우세한 Hachinohe 지진, 그리고 상대적으로 단주기 성분이 우세한 Ofunato 지진의 총 3 종류 계측 지진 기록을 입력 지진파로 이용하였다. 지반 응답 해석은 각 입력 지진파를 붕괴 방지 수준(0.120g)과 기능 수행 수준(0.042g)의 암반 노두 가속도 수준으로 조절하여 두 수준에 대해 모두 수행하였다. 일반적으로 동일 부지 조건에 대해서도 입력 지진의 주파수 성분 및 크기에 따라 서로 다른 지표면 응답 특성을 보이므로, 본 연구의 3 종류 지진파를 이용한 두 가지 수준의 해석은 대상 지역에 대한 종합적 지진 응답 특성 평가 결과로 바로 활용하기에는 제한적이다. 따라서 암반 노두 조건의 설계 스펙트럼에 준하는 인공 지진이나 국내 계측 지진과 같은 다양한 입력 지진을 적용한 추가 보완 해석을 통해 서울 대상 평야 지역의 지진 증폭 특성의 보다 체계적인 정량화가 가능할 것으로 판단된다.

4. 서울 평야 지역의 지진 응답 특성 평가

지반의 지진시 응답 특성은 지표면의 가속도(속도, 변위) 크기와 그의 주기(주파수)별 분포로 대표될 수 있으며, 해당 지반의 특정 주기에서의 공진 응답(resonant response) 분포를 고려하여 상부 구조물의 내진 설계 및 내진 성능 개선을 수행하게 된다. 이와 같은 지반의 응답 특성은 본 연구에서 실시한 응답 해석을 통해 정량적으로 평가할 수 있고, 더불어 지반의 공진 응답 주기인 고유 주기를 간편하게 예측하여 확인할 수 있다. 본 연구에서는 서울 평야

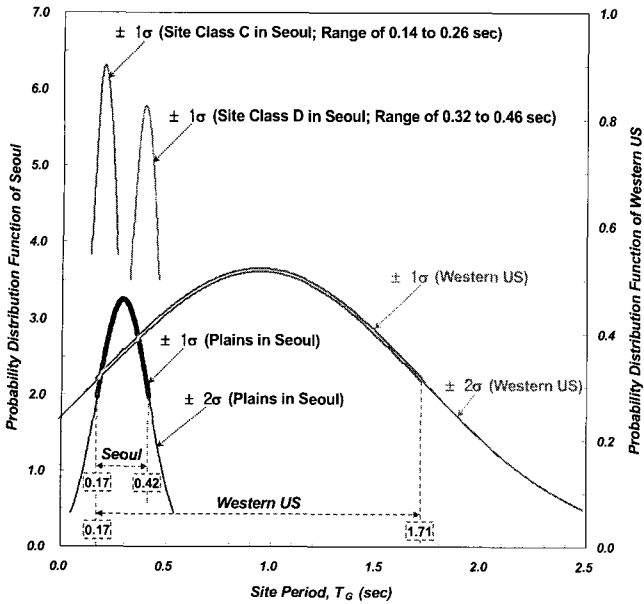
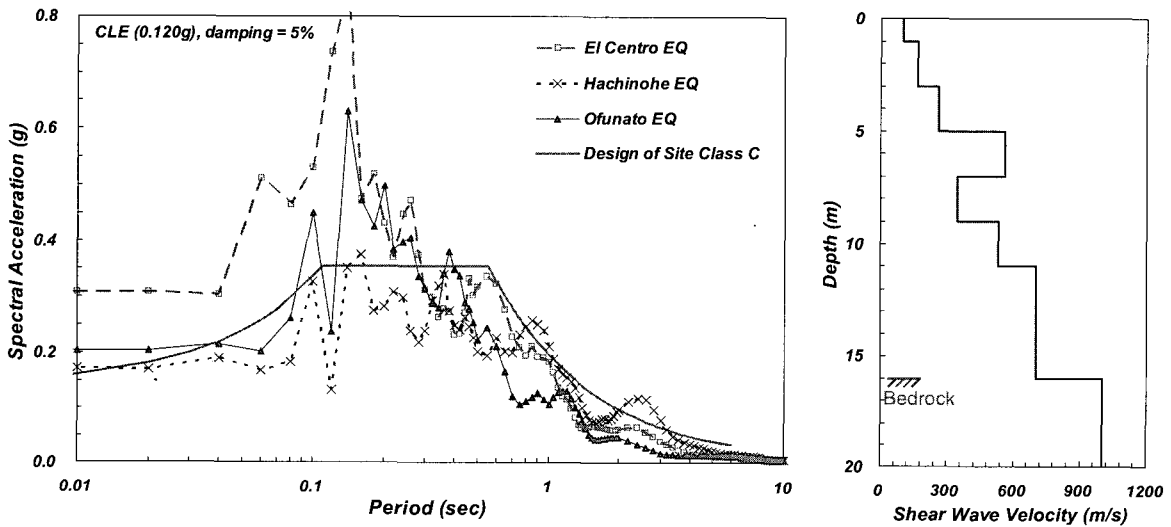


그림 7 서울 평야 및 미국 서부 지역에 대한 지반 고유 주기의 정규 분포

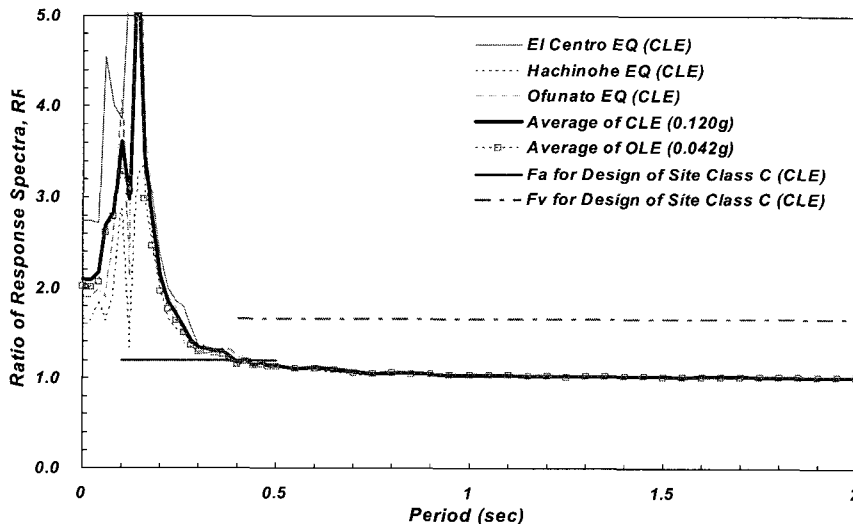
지역에 대한 체계적 지진 응답 특성 평가의 일환으로, 현행 국내 내진 설계 기준에 채택된 지반 증폭 계수의 근본적 지반 조건인 미국 서부 지역(WUS) 부지들과 서울 대상 부지들의 지반 고유 주기 분포 경향을 비교하고, 대상 부지들에 대한 응답 해석 결과를 국내 설계 기준과 정량적으로 비교·분석하였다.

4.1 서울 평야 지역과 미국 서부 지역의 부지 고유 주기 비교

부지별 공진 응답 특성은 이미 제시된 식 (7)의 고유 주기를 통해 간편하게 확인할 수 있으며, 서울 대상 평야 지역의 부지 고유 주기와 국내 지반 증폭 계수의 근간인 미국 서부 지역의 고유 주기를 결정하여 지진 응답 특성을 예측·비교하였다. 비교 연구에 활용된 미국 서부 지역 지반 특성 자료는 1994년 미국 서부 지역에서 발생한 Northridge 지진 이후 1997년부터 시작된 ROSRINE(Resolution Of Site Response Issues from the Northridge Earthquake) 공동 연구 프로젝트의 대상 부지들에 대한 지반 조사 자

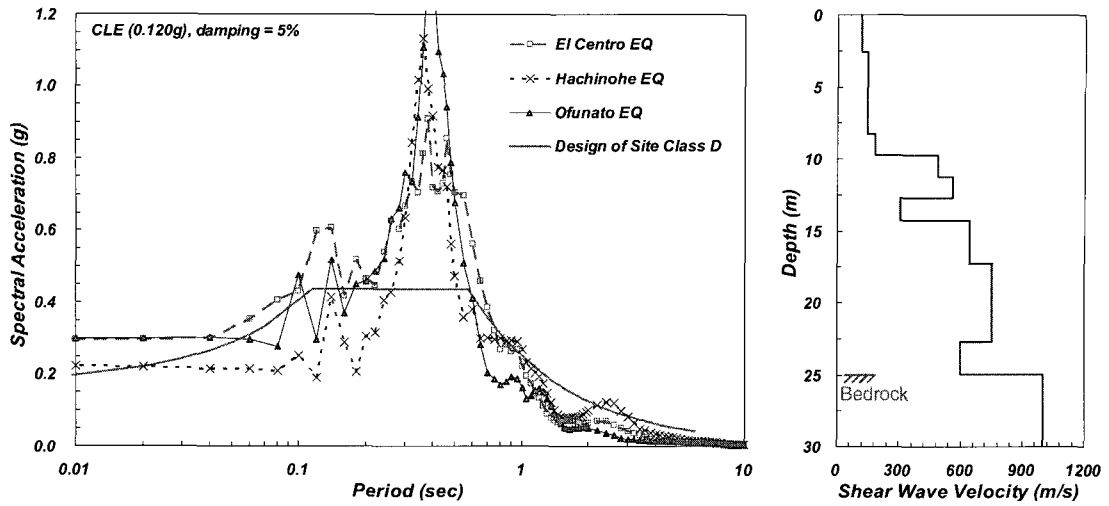


(a) 응답 스펙트럼 및 깊이별 전단파속도 분포

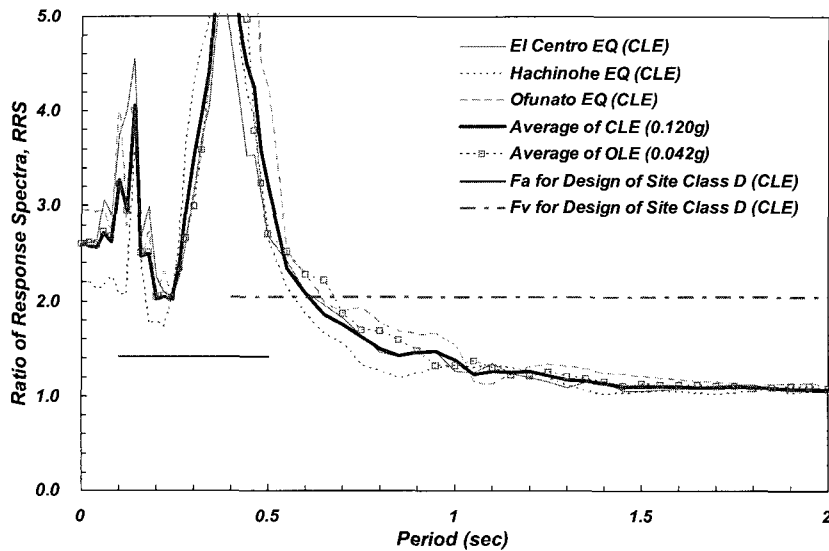


(b) 응답 스펙트럼 비

그림 8 대표적 지반 분류 C 부지($V_{s30}=479\text{m/s}$, $T_G=0.18\text{초}$)의 지표면 가속도 응답 결과



(a) 응답 스펙트럼 및 깊이별 전단파속도 분포



(b) 응답 스펙트럼 비

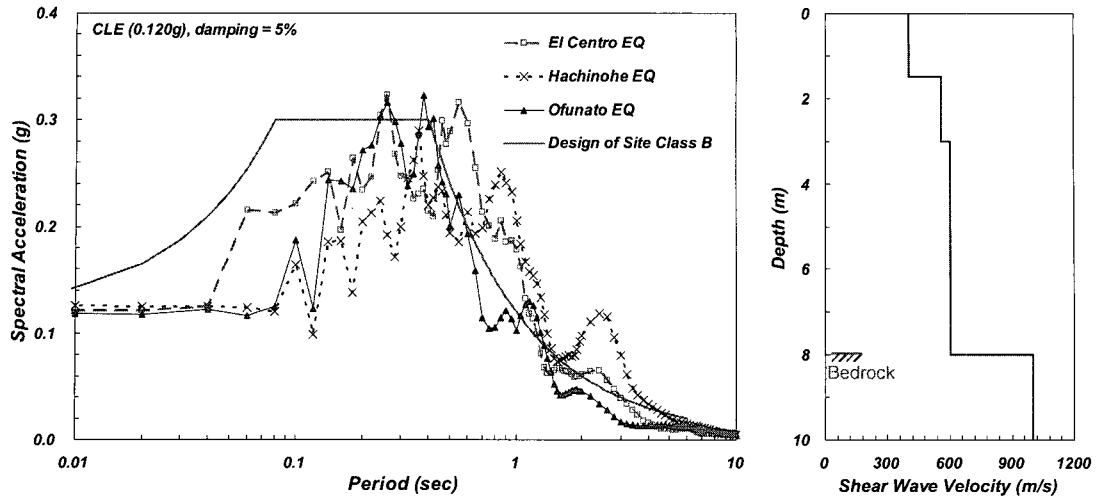
그림 9 대표적 지반 분류 D 부지($V_{s30}=295\text{m/s}$, $T_G=0.39\text{초}$)의 지표면 가속도 응답 결과

료 이다(Sun, 2004). 수집된 ROSRINE 부지들의 기반암 심도를 확인한 결과, 미국 서부 지역 부지들의 기반암 심도는 대부분 50~300m(최대 300m 이상)로서 국내 기반암 심도(최대 50m 정도)에 비해 매우 깊었다. 그림 7에는 부지별 지층 및 V_s 분포를 토대로 산정된 서울 평야 지역과 미국 서부 지역 부지들에 대한 지반 고유주기의 정규 분포를 도시하였다. 서울 평야 지역의 지반 고유주기는 지반 분류 C의 경우 0.14~0.26초 그리고 지반 분류 D의 경우 0.32~0.46초 범위이며, 전체적으로 0.5초보다 작은 0.2~0.4초 정도의 분포를 보인 반면, 미국 서부 지역은 국내 지역에 비해 매우 깊은 기반암 심도를 보이므로 지반 고유주기도 상당히 큰 0.2~1.7초 정도의 범위를 보였다. 이와 같은 지반 고유주기 분포로 볼 때, 서울 평야 지역은 미국 서부 지역(장주기 증폭 지배)과는 달리 단주기 증폭 특성이 지배적일 것으로 판단되고, 이로 인해 미국 서부 지역 근간인 현행 국내 지반 증폭 계수와 실제 서울 평야 지역에 대한 증폭 계수 간의 차이가 발

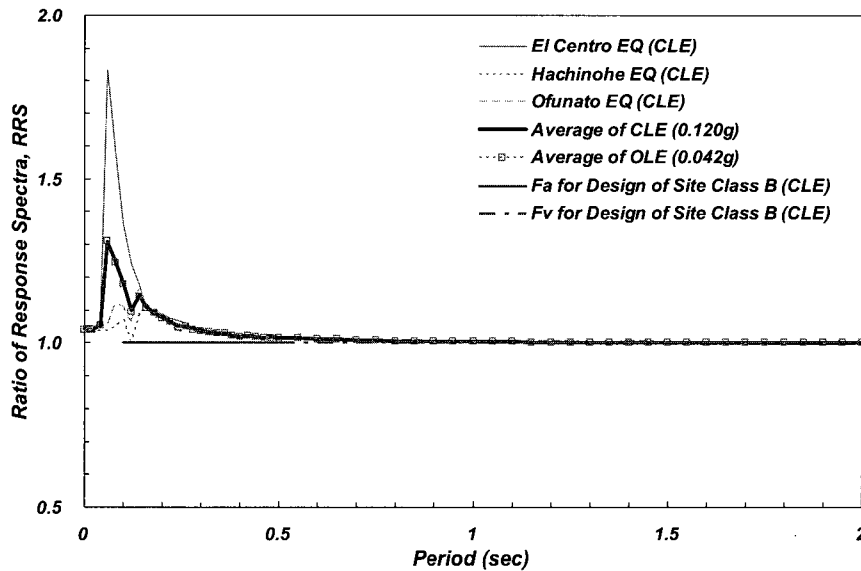
생할 수 있다.

4.2 서울 평야 지역 지반의 지진 증폭 특성 분석

서울 평야 지역에 분포하는 총 350 부지를 대상으로 I 등급 구조물에 대한 붕괴 방지 및 기능 수행 수준의 일차원 등가선형 지반 응답 해석을 수행한 결과, 지표면 최대 가속도는 암반 노두 가속도에 비해 최대 2.5배 정도까지 증폭되었으며, 그 증폭 정도는 붕괴 방지 수준과 기능 수행 수준으로 구분되는 암반 노두 입력 가속도 수준에 관계없이 부지별로 유사하였다. 가속도 수준에 무관한 이러한 증폭의 유사성은 해석 가속도 수준이 비교적 낮기 때문에 지반의 발생 변형률이 작았고, 그로 인해 변형률에 따른 흙의 비선형적 거동의 영향이 작았기 때문이다. 그림 8과 그림 9는 각각 서울 평야 지역의 주요 지반 조건인 지반 분류 C와 지반 분류 D의 대표 부지에 대한 붕괴 방지 수준의 지표면 가속도 응답 스펙트럼 및 깊이



(a) 응답 스펙트럼 및 깊이별 전단파속도 분포

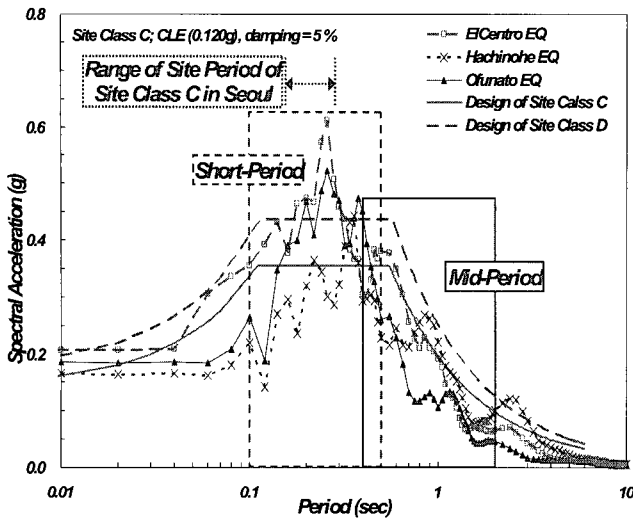


(b) 응답 스펙트럼 비

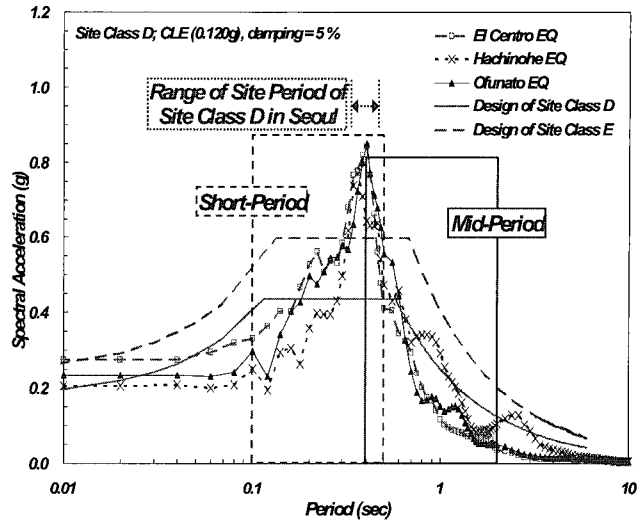
그림 10 대표적 지반 분류 B 부지($V_{s30}=817\text{m/s}$, $T_0=0.06\text{초}$)의 지표면 가속도 응답 결과

별 V_s 분포와 지표면 대 암반 노두의 응답 스펙트럼 비 (RRS)를 도시한 것이다. 비교 목적으로 응답 스펙트럼은 표준 설계 응답 스펙트럼과 함께 도시하였고, 응답 스펙트럼 비는 현행 내진 설계 기준의 단주기(0.1~0.5초) 지반 증폭 계수(F_a) 및 중장주기(0.4~2.0초) 지반 증폭 계수 (F_v)와 비교하였다. 대표 부지는 각 지반 조건별 V_{s30} 의 정규 분포(그림 4 참조)의 중앙값인 평균(B 부지는 821 m/s, C 부지는 484m/s, D 부지는 296m/s)에 가장 가까운 V_{s30} 을 보이는 시추 조사 부지를 선정하였다. 지반 분류 C 부지의 스펙트럴 가속도(그림 8(a))는 지진파에 따라 단주기 영역인 부지 고유 주기 부근에서 표준 설계 응답 스펙트럼 보다 크게 증폭되었으며, 이로 인해 그림 8(b)와 같이 현행 국내 내진 설계의 증폭 계수인 F_a 및 F_v 의 경향과는 달리 단주기 영역의 RRS가 중장주기 영역에 비해 크게 나타났다. 또한, 지반 분류 D 부지의 스펙

트럴 가속도(그림 9(a))는 모든 지진파에서 단주기 및 중 주기 영역에서 표준 설계 응답 스펙트럼보다 크게 증폭되었고, 특히 지반 고유 주기 부근에서는 매우 크게 증폭된 결과를 보였다. RRS(그림 9(b))는 0.6초보다 작은 영역에서 현행 F_v 보다도 더 크게 나타나고, F_a 보다는 매우 큰 값을 보인 반면, 0.6초 이상의 영역에서는 F_v 에 비해 작은 값을 나타냈다. 이러한 지반 분류 C 및 D의 대표 부지에서의 현행 내진 설계 기준과의 상이한 가속도 응답 특성은 대부분 부지들의 응답에서도 확인할 수 있었다. 그러나 서울 평야 지역 내 대상 부지중 극히 일부에 해당하는 지반 분류 B의 경우, 그림 10(a)에서 확인할 수 있는 바와 같이 전반적으로 해석으로부터 결정된 부지의 응답 스펙트럼과 표준 설계 스펙트럼이 유사한 경향을 보였고, RRS(그림 10(b))는 0.1초 부근을 제외하고는 대체로 1(unit) 정도로 결정되었다. 전체적인 지반 분류 조건

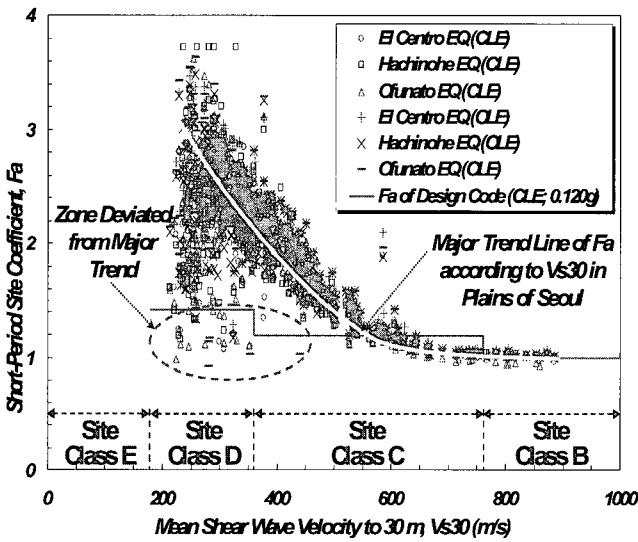


(a) 지반 분류 C

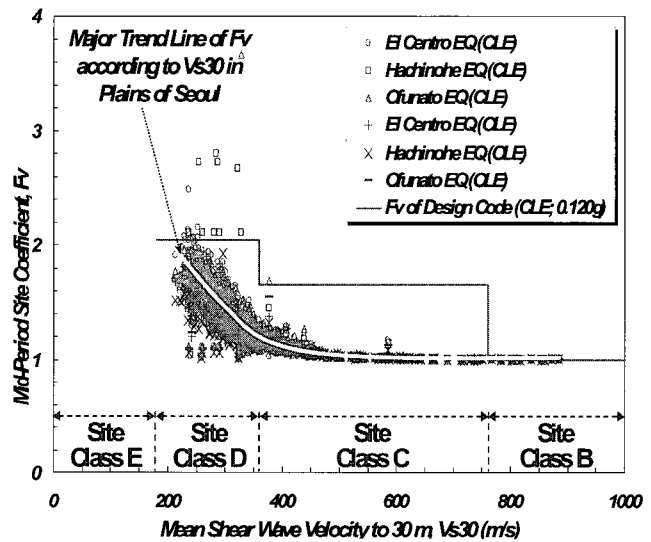


(b) 지반 분류 D

그림 11 서울 평야 지역의 지반 분류별 평균 응답 스펙트럼(붕괴 방지 수준)



(a) 단주기 증폭 계수, F_a



(b) 중장주기 증폭 계수, F_v

그림 12 서울 평야 지역의 V_{s30} 에 따른 지반 증폭 계수

별 부지의 응답 특성의 경향은 기능 수행 수준도 붕괴 방지 수준과 일치하였다.

서울 평야 지역의 지반 분류 C와 D에 해당되는 해석 대상 부지들의 입력 지진파별 붕괴 방지 수준의 평균 응답 스펙트럼을 그림 11에 표준 설계 응답 스펙트럼들과 함께 도시하였다. 지표면에서의 지진 응답은 기반암 상부 지반 조건 뿐만 아니라 진원이나 전파 경로에 따라 달라질 수 있는 기반암 도달 지진파의 특성에 의해서도 변화되므로, 그림 11에서도 주파수 성분이나 지속 시간이 서로 다른 해석 지진파별로 다소 상이한 평균 응답 스펙트럼을 보였다. 따라서 지역적 발생 가능 지진 형태의 도출 및 이를 포함한 다양한 지진파에 대한 추가 해석 연구를 지속적으로 수행함으로써 보다 신뢰성 높은 부지별 평균적 의미의 응답 스펙트럼 결정이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 현재까지의 세 종류 지진파에 대한 해석 결과

를 토대로 살펴 볼 때, 위의 지반 분류 C와 D의 대표 부지 응답 특성(그림 8 및 그림 9)에서도 제시된 바와 같이, 지반 분류 C(그림 11(a))의 경우 주로 단주기 영역에서 그리고 지반 분류 D(그림 11(b))의 경우 단주기(0.1~0.5초) 영역과 더불어 중장주기(0.4~2.0초) 영역의 경계 부근에서 해당 설계 스펙트럼에 비해 크게 증폭된 평균 응답 스펙트럴 가속도를 확인할 수 있으며, 전반적으로 주로 단주기 영역에서 크게 증폭된 스펙트럴 가속도를 나타냈다. 특히, 각 지반 분류별 고유주기 구간(그림 7 참조) 내에서는 C와 D 부지 응답 스펙트럴 가속도가 각각 증폭이 더 클 것으로 간주되는 다음 단계의 지반 분류 D와 E의 설계 스펙트럼보다도 더 크게 나타났다. 서울 평야 지역 부지들에 대한 해석으로부터 결정된 응답 스펙트럼과 설계 스펙트럼의 이러한 큰 차이는 부지 효과의 정량적 지표인 증폭 계수의 차이로부터 기인한 것이며, 현

행 국내 내진 설계를 위한 증폭 계수는 국내 부지에 비해 기반암 심도가 깊고 지반 고유 주기가 상당히 큰 미국 서부 지역의 지반 특성을 반영하고 있기 때문이다.

서울 대상 부지들에서의 해석 결과를 이용한 설계 조건과의 응답 특성 비교와 더불어 기 산정된 부지별 RRS 기반의 식 (3)과 식 (4)에 따라 각각 단주기와 중장주기 증폭 계수, F_a 와 F_v 를 산정하고, 지반 증폭 계수의 결정을 위한 지반 분류 기준인 V_{s30} 과 비교하여 부지 고유의 지진 증폭 특성을 종합적으로 평가하였다. 그림 12는 각 부지의 증폭 계수와 V_{s30} 과의 관계이며, 현행 국내 내진 설계 지반 분류 체계에서 제시한 지진 구역 I(0.11g)과 II(0.07g)의 증폭 계수(표 1 참조)를 선형적으로 외삽 보간한 서울 지역 붕괴 방지 수준(0.120g)의 압반 노두 가속도에 해당되는 증폭 계수를 함께 비교 도시하였다. Borchardt(1994)에 의해 이미 알려진 바와 같이 V_{s30} 의 증가에 따른 증폭 계수의 비선형적 감소를 확인할 수 있다. 중약진 구역인 서울 평야 지역의 부지들에 대한 본 해석에서 고려된 두 종류의 압반 노두 가속도 수준(0.120g와 0.042g)이 낮으므로 두 수준간 증폭 계수의 차이는 비교적 미미했으나, 해석 대상의 지진파 조건별로는 동일 V_{s30} 에서 증폭 계수간 다소의 차이를 보였다. 또한, 부분적으로는 그림 12에 삽입된 주요 경향 곡선과 상당한 차이를 보이거나 부지 특성에 따라 V_{s30} 이 작아도 증폭계수가 오히려 작아지는 경우도 존재하였으며, 특히 지반 분류 D 영역에서는 설계기준보다 F_a 가 오히려 작게 나타나는 부지들이 다수 분포(그림 12(a)의 파선 타원 영역)하고 있었다. 그러나 전반적인 관점에서는 모든 해석 조건(두 가속도 수준 및 세가지 입력 지진파 조건)을 종합한 주요 경향 관계 곡선을 현행 내진 설계 증폭 계수와 비교해 볼 때, 지반 분류 C와 지반 분류 D 영역에서 서울 평야 지역의 해석 결과가 현행 F_a 에 비해 크게 그리고 현행 F_v 에 비해 작게 나타났다. 이러한 증폭계수의 차이는 위의 응답 스펙트럼 비교 결과와도 상응된다. 즉, 서울 중약진 평야 지역과 미국 서부 강진 지역의 부지 고유의 지진 응답 특성 차이로 인해 미국 서부 지역의 지반의 증폭 특성에 근거한 현재 국내 내진 설계 기준의 F_a (그림 12(a))는 지반 운동을 과소평가하고 F_v (그림 12(b))는 과대평가하고 있다.

미국 서부 지역에서 1989년 발생한 Loma Prieta 지진의 계측 부지에서의 지표 지질과 지반 증폭 정도의 상관성 분석을 통하여 Borchardt⁽⁴⁾는 기반암 심도가 100~300 m 정도로 깊은 미국 서부 지역 부지들에 대해서 일반적인 지반 조사 수행 심도이자 상대적으로 얕은 심도인 30 m(100 ft)까지 전단파 속도(V_s)의 조화 평균인 V_{s30} 을 지반 분류 기준으로 제시하였다. 현재까지 V_{s30} 은 많은 지역의 내진 설계에서 부지 효과에 따른 F_a 와 F_v 의 객관적인 분류 기준으로서 효율적으로 적용되고 있다. 그동안 F_a 및 F_v 와 V_{s30} 의 적용성 검증은 주로 미국 서부 지역과 같이 기반암 심도가 깊고 지표면 부근 지반 강성이

균질하거나 깊이 증가에 따라 점진적으로 토사 강성이 증가하는 해외 지역들을 대상으로 진행되어 왔다^{(5),(8)}. 대상 지역 부지들의 지배적인 중장주기 증폭 특성으로 인해 UBC나 NEHRP 제안과 같은 내진 설계 기준에서는 단주기의 F_a 는 중장주기의 F_v 보다 작게 제안되어 있다. 반면, 국내 내륙 지역은 미국 서부 지역에 비해 기반암 심도가 최대 50 m 정도로서 상대적으로 얕고 토사의 강성이 큼에 따라 서울 평야 지역의 주요 증폭 특성과 같이 기존 내진 설계 기준과는 달리 F_a 가 크고 F_v 는 작게 나타난다⁽¹⁾. 따라서 서울 평야 지역의 일반적인 지진 증폭 특성은 국내 내륙 지역의 일반적인 증폭 특성과 유사하거나 일치한다.

또한, 서울 평야 지역의 경우 이러한 일반적인 국내 내륙의 주기별 지진 증폭 경향과는 달리 V_{s30} 이 비교적 작은 지반 분류 D 조건에서 단주기의 F_a 가 오히려 현행 설계 기준에 보다 작게 나타나는 부지들(그림 12(a)의 파선 타원 영역)이 존재하였다. 즉, 동일 V_{s30} 에서도 부지 특성에 따라 증폭 정도가 매우 다르게 나타날 수 있다. 이처럼 F_a 가 작은 부지들의 지층 구성을 확인한 결과, 깊이가 증가함에 따라 V_s 가 점진적으로 증가하는 대부분의 부지들과는 달리 기반암과 지표면 사이의 토사 층의 중간에 V_s 가 작은 연약한 지층이 분포하고 있었다. 기반암 상부 토사 층 중간에 상하부 지층에 비해 강성이 상대적으로 작은 연약한 지층이 존재할 경우 하부로부터 전달된 지진파가 그 층에서 감쇠되어 지표면 증폭이 작게 발생하게 되며⁽²⁾, 이러한 현상을 기저 고립 효과(base isolation effect)라고 한다.⁽¹⁷⁾ V_{s30} 과 같은 평균적인 지반 강성에 근거해 증폭 계수를 결정하는 현행 지반 분류 기법은 토사 층에 연약층이 존재하는 기저 고립 효과 발생 부지에 대해서는 국내 내륙의 일반적인 부지에서와는 달리 지진 증폭 및 그에 따른 지반 운동을 과대평가할 수 있다. 따라서 다양한 지반 조건에 대한 지속적인 해석적 및 경험적 연구를 통하여 내진 설계를 위한 지반 증폭 계수의 결정 과정에서 부지의 평균적인 강성 뿐만 아니라 깊이별로 변화되는 지층 강성을 고려할 수 있는 종합적 또는 차별적 방안이 모색되어야 할 것으로 판단된다.

서울 평야 지역의 경우, 기반암 상부 토사 층 내에 연약한 지층이 존재하는 부지는 일부 지역에서 제한적으로 분포하므로, 지층 구성의 사전 확인을 통하여 대체적으로 부지 고립 효과의 발생 유무를 예측할 수 있다. 따라서 부지 고립 효과가 발생하지 않을 것으로 예측되는 서울 평야 지역의 일반적인 부지에 대해서는 지진 응답 해석의 수행 없이 설계 지반 운동을 위한 증폭 계수의 결정 방안으로서 그림 12의 V_{s30} 에 따른 단주기와 중장주기 증폭 계수, F_a 와 F_v 의 주요 경향 곡선이 활용 가능할 것으로 보인다. 그렇다 할지라도 본 연구에서는 광범위한 서울 내에서 두 평야 지역에 분포하는 총 350 곳의 기존 시추 조사 부지만을 대상으로 세 종류 지진파에 대한 지진 응답 특성 평가를 수행하였으므로, 국내의 일반적인 부지에서의 설계 지반 운동 결정을 위한 증폭 계수의 실

질적 활용에는 제한적이다. 그러므로 현행 국내의 내진 설계 지반 운동의 합리적 결정을 위해서는 다양한 지역적 지반 특성에 대한 종합 평가를 실시하고 이를 토대로 여러 조건을 고려한 부지 고유의 지진 응답 특성을 정량화 함으로써, 국내 지반 특성에 적합한 증폭 계수와 그에 따른 지반 분류 기법을 체계화하는 종합적 부지 고유의 증폭 특성 평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 주거와 산업이 밀집됨에 따라 막대한 지진 피해가 집중 발생할 수 있는 대도시 서울에 대해 GIS 기반의 지형 분석을 실시하여 두 곳의 4km×4km 평야 지역을 선정하고, 대상 지역 내에 분포하는 총 350 곳의 기존 시추 조사 부지들에 대한 지진 응답 해석을 수행하여 부지 고유의 지진 증폭 특성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 대상 시추 부지에 대한 지진 응답 해석의 입력 전단파 속도(V_s) 결정을 위하여 국내 내륙의 다양한 지역에서 수집된 공내 탄성과 시험 자료를 토대로 V_s 와 N 값의 상관관계를 다음의 식과 같이 도출하였다.

$$V_s = 65.55 N^{0.40}$$

도출된 V_s 와 N 값의 경험적 상관관계에 따라 서울 평야 지역 부지들의 깊이별 V_s 분포를 결정하고 지반 분류 기준인 지하 30 m까지의 평균 $V_s(V_{s30})$ 에 따라 대상 부지를 분류한 결과, 대부분의 부지들이 지반 분류 C와 D에 해당되며, V_{s30} 은 주로 C와 D의 경계(360 m/s) 부근에 밀집되어 250~550 m/s의 좁은 분포 범위를 보였다.

- 2) 대상 지역의 수집 파악된 지반 특성을 현행 국내 지반 증폭 계수의 근간인 미국 서부 지역의 특성과 비교해 본 결과, 서울 평야 지역은 미국 서부 지역에 비해 기반암 깊이가 매우 얇고, 지반 고유주기는 0.2~0.4초 정도로서 미국 서부의 0.2~1.8초에 비해 매우 작았다.
- 3) 대상 부지들에 대한 지반 응답 해석 결과로부터 공진 영역에 해당되는 지반 고유주기 부근에서 설계 응답 스펙트럼에 비해 크게 증폭되는 스펙트럴 가속도를 확인하였다. 또한, 현행 내진 설계 기준의 단주기와 중장주기 지반 증폭 계수 F_a 와 F_b 는 서울 평야 지역 내 대부분의 부지들에서의 단주기(0.1~0.5초) 증폭은 과소평가하고 중장주기(0.4~2.0초) 증폭은 과대평가하고 있는 것으로 확인 되었다.
- 4) 서울 평야 지역의 지반 분류 D 부지들 중에서는 국내 내륙 지반의 일반적인 F_a 값과는 달리 현행 내진 설계 기준의 F_a 보다도 작은 값을 보이는 기저 고립 효과 발생 부지도 부분적으로 존재하였으며, 이에 대한 해석적 및 경험적 연구와 더불어 다양한 지역적 지반에

서의 증폭 특성 평가를 통한 국내 고유의 지반 증폭 계수 및 지반 분류 기법의 체계화 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 서울시의 지반 조사 자료 제공과 서울대학교 공학연구소의 연구 협조에 의해 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Sun, C. G., "Geotechnical Information System and Site Amplification Characteristics for Earthquake Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula," Ph.D. Dissertation, Seoul National University, 2004.
2. Kim, D. S., Chung, C. K., Sun, C. G., and Bang, E. S., "Site Assessment and Evaluation of Spatial Earthquake Ground Motion of Kyeongju," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, 2002, pp. 371-387.
3. 건설교통부, 내진설계기준연구(II), 1997.
4. Borchardt, R. D., "Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification)," *Earthquake Spectra*, Vol. 10, 1994, pp. 617-653.
5. Dobry, R., Ramos, R., and Power, M. S., *Site Factor and Site Categories in Seismic Codes*, Technical Report MCEER-99-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1999.
6. ICBO, *1997 Uniform Building Code, Volume 2 - Structural Engineering Design Provisions*, International Conference of Building Officials, 1997.
7. Dobry, R., Borchardt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., Power, M. S., Rinne, E. E., and Seed, R. B., "New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, 2000, pp. 41-67.
8. Borchardt, R. D., "Empirical Evidence for Site Coefficients in Building Code Provisions" *Earthquake Spectra*, Vol. 18, 2002, pp. 189-217.
9. Idriss, I. M., and Sun, J. I., *User's Manual for SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits*, University of California, Davis, 1992.
10. Schnabel, P. B., Lysmer, J. and 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, 1972.
11. 천성호, 선창국, 정충기, "지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용", 대한토목학회 논문집, Vol. 25, No. 2C, 2005, pp. 103-115.
 12. 김동수, 방은석, 서원석, "표준관입시험을 이용한 업홀에서 전단파 속도 주상도의 도출", 한국지반공학회 논문집, Vol. 19, No. 2, 2003, pp. 135-146.
 13. Imai, T. and Tonouchi, K., "Correlation of N-Value with S-Wave Velocity and Shear Modulus," *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, 1982, pp. 57-72.
 14. Ohta, Y. and Goto, N., "Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristic Soil Indexes," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, 1978, pp. 167-187.
 15. Ohsaki, Y. and Iwasaki, R., "On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratio of Soil Deposits," *Soils and Foundations*, Vol. 13, 1973, pp. 61-73.
 16. Imai, T. and Yoshimura, Y., "Elastic Wave Velocity and Soil Properties in Soft Soil," *Tsuchi-to-Kiso*, Vol. 18, 1970, pp. 17-22 (in Japanese).
 17. Sugito, M., Oka, F., Yashima, A., Furumoto, Y. and Yamada, K., "Time-Dependent Ground Motion Amplification Characteristics at Reclaimed Land after the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake," *Engineering Geology*, Vol. 56, 2000, pp. 137-150.