

국내 지반 특성에 따른 합리적 증폭 계수의 결정을 위한
지반 분류 체계 개선 방안 고찰

Modification of Site Classification System for Amplification
Factors considering Geotechnical Conditions in Korea

선창국*
Sun, Chang-Guk

정충기**
Chung, Choong-Ki

김동수**
Kim, Dong-Soo

ABSTRACT

For the site characterization at two representative inland areas, Gyeongju and Hongsung, in Korea, in-situ seismic tests containing boring investigations and resonant column tests were performed and site-specific ground response analyses were conducted using equivalent linear as well as nonlinear scheme. The soil deposits in Korea were shallower and stiffer than those in the western US, from which the site classification system and site coefficients in Korea were derived. Most sites were categorized as site classes C and D based on the mean shear wave velocity to 30 m, V_{s30} ranging between 250 and 650 m/s. Based on the acceleration response spectra determined from the site-specific analyses, the site coefficients specified in the Korean seismic design guide underestimate the ground motion in the short-period band and overestimate the ground motion in mid-period band. These differences can be explained by the differences in the bedrock depth and the soil stiffness profile between Korea and western US. The site coefficients were re-evaluated and the preliminary site classification system was introduced accounting for the local geologic conditions on the Korean peninsula.

1. 서론

지역적 지질 조건과 이에 따른 지반의 동적 특성은 지진시 지표면에서의 지반 운동에 매우 큰 영향을 미치며, 이러한 영향은 기존 해외의 수많은 실제 사례와 연구를 통해 보고되어 왔다(Sun, 2004). 즉, 진원에서 발생한 지진파는 전달 매체인 암반이나 토사를 통해 전파되고 이 과정 중에 증폭 또는 감폭되어 지표면의 구조물에 작용한다. 일반적으로 지진파는 기반암 상부의 토사를 통

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원, 박사후연수자

** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

*** 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과, 교수

해 전달되는 과정중에 증폭되며, 현행 국내외의 내진 설계 기준에서도 이러한 특성은 증폭 계수로 반영되어 설계 지반 운동의 결정에 보편적으로 활용되고 있다(BSSC, 2000; 건설교통부, 1997). 지진시 지반의 증폭 계수는 지역적 지질 및 지반의 동적 특성에 따라 매우 상이하며, 이의 정량적 평가는 해외의 경우 각 지역의 실제 계측 자료와 부지 응답 해석 결과의 분석을 통해 진행되어 왔다. 그러나 불행히도 우리나라의 경우 지진 계측이 비교적 최근에 활성화 되었을 뿐만 아니라 그 이후 현재까지 공학적으로 활용 가치가 높은 계측 자료의 기록도 아직은 미흡한 실정이다. 또한, 1997년 내진 설계 기준의 제정 당시 필수적 사전 검토 과정인 지반 조건에 따른 증폭 특성의 정량적 평가 없이 국가적 내진 대책의 조속한 체계화를 위해 해외 강진 지역인 미국 서부의 지반 조건별 증폭 계수를 준용하게 되었다(Kim 등, 2002). 이로 인해 국내에서의 내진 설계 및 내진 성능 평가에 활용되는 지반 증폭 계수는 지진공학적 여러 조건에 따라 과대 또는 과소하게 적용될 수 있다.

증폭 계수는 지반 조건별로 구분된 지반 분류 체계를 통해서 설계 기준화 되어 있으며, 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 고려하기 위한 것으로서 국내의 특성 이라기보다는 미국 서부 지역의 특성이라고 할 수 있다. 따라서 국내 고유의 상황에 적합하게 내진 설계 지반 운동을 합리적으로 결정하기 위해서는 국내 지반 특성에 대한 충분한 평가가 선행되어야 하며, 이를 통한 지반 분류 체계의 합리화가 필요하다. 본 연구에서는 국내 설계 지반 운동의 합리화 및 체계화의 일환으로 우리나라 내륙의 두 지역에 대한 지반 조사를 수행하고, 그 결과 나타난 지질 및 지반 특성을 현행 지반 분류 체계의 근간인 미국 서부 지역 특성과 비교·분석하였다. 더불어 지진 계측 기록이 부족한 국내의 대상 지역내 각 부지에 대한 응답 해석을 실시하고 결과의 종합 분석을 통해 국내 고유의 지반 증폭 계수를 산정하였다. 또한, 국내 내륙의 두 지역을 대상으로 조사된 지반 특성과 산정된 지반 증폭 계수를 토대로 기존 지반 분류 체계의 개선 방안을 제시하였다.

2. 현행 지반 분류 체계

진원에서의 단층 활동으로 발생한 지진파는 일반적으로 거리에 따라 감쇠되고 그 발생 에너지의 크기 역시 작아지게 된다. 실질적으로 인간이 직접 체험하는 지표면 부근 지진동의 크기 및 형태는 진원이나 진앙으로부터 동일 거리의 부지들 일지라도 해당 부지 기반암까지의 전파 경로뿐만 아니라 기반암부터 지표면까지 구성 토사의 동역학적 특성별 응답 거동에 따라 크게 달라질 수 있다. 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 Coefficient)인 C_a 와 C_v 의 형태로 내진 설계 기준에 반영되어 있다(건설교통부, 1997). 지진 계수를 토대로 발생 지진파 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 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 증폭 계

수(Site (Amplification) Coefficient (Factor))인 F_a 및 F_v 의 곱의 형태로 표현될 수 있다(Sun, 2004).

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

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

지반의 증폭 계수는 기반암 노두대 지표면 지반 운동의 상대적인 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. 식 (3)과 식 (4)는 각각 응답 스펙트럼 기반의 단주기와 중장주기 증폭 계수의 계산식으로서, 적분 대상을 통칭하여 지표면대 기반암의 응답 스펙트럼 비(Ratio of Response Spectra, RRS)라고 한다.

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

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

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

본 연구에서도 위의 식 (3) 및 식 (4)를 토대로 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, 250년, 500년, 1000년, 그리고 2400년의 6단계 지진 재현 주기별로 보통암 지반(Rock, 지반 분류 B)에 대한 재해도가 작성되어 있으므로 고려 대상 지진의 재해도를 토대로 직접 암반 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 $S_A \sim S_E$)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 기록의 고찰을 토대로 Borchardt(1994)가 제안한 지표면부터 지하 30 m(100 ft 또는 30.48 m)까지의 평균 전단파 속도(V_{s30} 또는 $\overline{V_s}$)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 지반 분류 체계를 정리하여 제시한 것이다.

$$V_{s30} = 30 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}} \quad (5)$$

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

이처럼 국내 내진 설계 기준의 설계 응답 스펙트럼 결정을 위한 지진 계수는 국내 역사 지진 기록을 토대로 설정된 지역 계수와 해외 강진 지역인 미국 서부의 지역적 지반 특성이 반영된 지반 분류 체계의 증폭 계수 간의 부적절한 조합으로 구성되어 있으므로 개선이 필요한 실정이다.

표 1. 지반 증폭 특성 정량화를 위한 지반 분류 체계

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		-	-	-	-	-	-	-	-

3. 대상 지역의 지반 특성

국내 내륙의 지형 및 지질 특성을 대표할 뿐만 아니라 역사 및 계기 지진 기록이 존재함에 따라 지진학적 가치가 높은 분지 지형의 경주와 구릉 지형의 홍성을 대상으로 선정하고(Sun, 2004), 현장에서의 시추 조사 및 다양한 탄성파 시험과 실내 공진주 시험을 수행하여 지반 특성을 평가하였다. 지반 조사는 대상 지역의 지형 변화를 고려하여 경주의 경우 하천 5개소, 구릉 8개소와 평지 15개소의 총 28 부지에서 수행되었고, 홍성의 경우 하천 2개소, 구릉 8개소와 평지 6개소의 총 16 부지에서 실시되었다. 더불어 대상 부지 내에서 기수행된 지반 조사 자료들을 수집하여 지반 특성 파악에 추가적으로 활용하였다. 수행된 현장 지반 조사를 방법에 따라 구분하면 경주에서는 16개소의 시추 조사와 4개소의 크로스홀(crosshole), 12개소의 다운홀(downhole) 및 26개소의 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 시험이며, 홍성에서는 9개소의 시추 조사와 3개소의 크로스홀, 6개소의 다운홀 및 15개소의 SASW 시험으로 구성된다.

3.1 대상 지역 지반의 지질 및 동적 특성

대상 지역에서 수행된 지반 조사 및 수집 자료의 분석 결과, 경주는 산지를 제외한 평지에서 하천의 범람 및 퇴적 작용에 의해 형성된 모래와 자갈질 퇴적토가 풍화대의 상부에 10~40 m 두께로 발달되어 있으며, 홍성은 장기간의 풍화 작용에 의한 풍화토 및 풍화암이 비교적 얇은 퇴적토 아래에 10~45 m 두께로 형성되어 있다. 두 지역 모두 평지의 중심 지역에서 기반암의 심도는 최대 50 m 정도로 나타났다. 또한, 각 부지별로

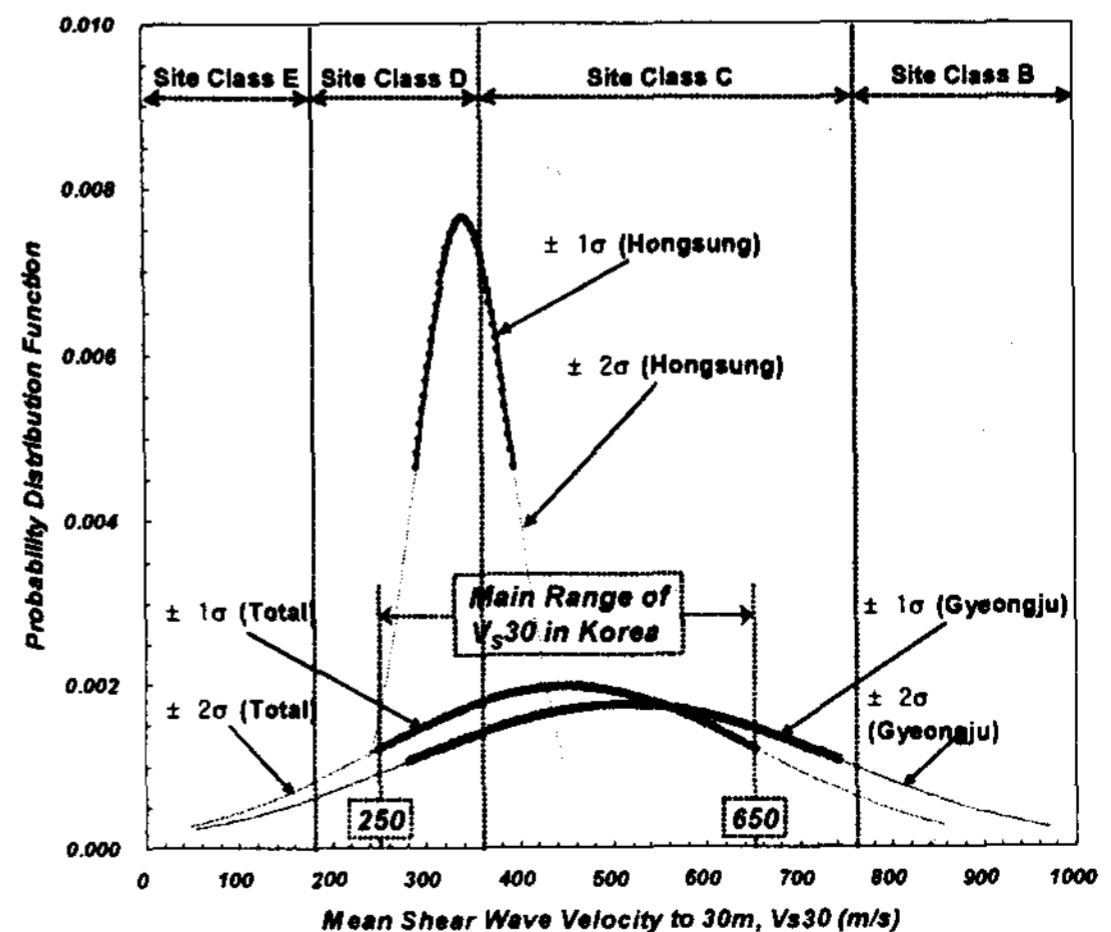


그림 1. 국내 대상 지역에 대한 V_{s30} 의 정규 분포

수행된 탄성과 시험으로부터 기반암으로 간주할 수 있는 연암 심도까지의 깊이별 V_s 분포를 결정하여 동적 특성을 평가하였다. 부지별로 결정된 V_s 분포는 지반 응답 해석의 입력 값으로 활용될 뿐만 아니라 지반 분류를 위한 V_{s30} 의 산정에도 이용된다. 그림 1은 대상 지역에 대한 V_{s30} 의 통계 분포로서, 지역별로 경주는 주로 지반 분류 C, 그리고 홍성은 주로 D로 분류됨을 확인할 수 있으며, 전체적으로 국내 내륙에 위치한 두 지역의 V_{s30} 은 자료의 68% 영역에 해당되는 $\pm 1\sigma$ (표준 편차) 구간에서 지반 분류 C와 D의 경계($V_{s30}=360$ m/s) 부근에 밀집된 좁은 범위로서 250~650 m/s의 분포를 보였다. 지반의 분류 등급에 따라 증폭 계수와 설계 지반 운동이 크게 달라짐을 감안할 때, C와 D의 경계에 밀집되어 나타나는 국내 내륙 지역에 대해서는 그 분포 특성을 고려한 합리적 대안이 설정될 필요가 있다.

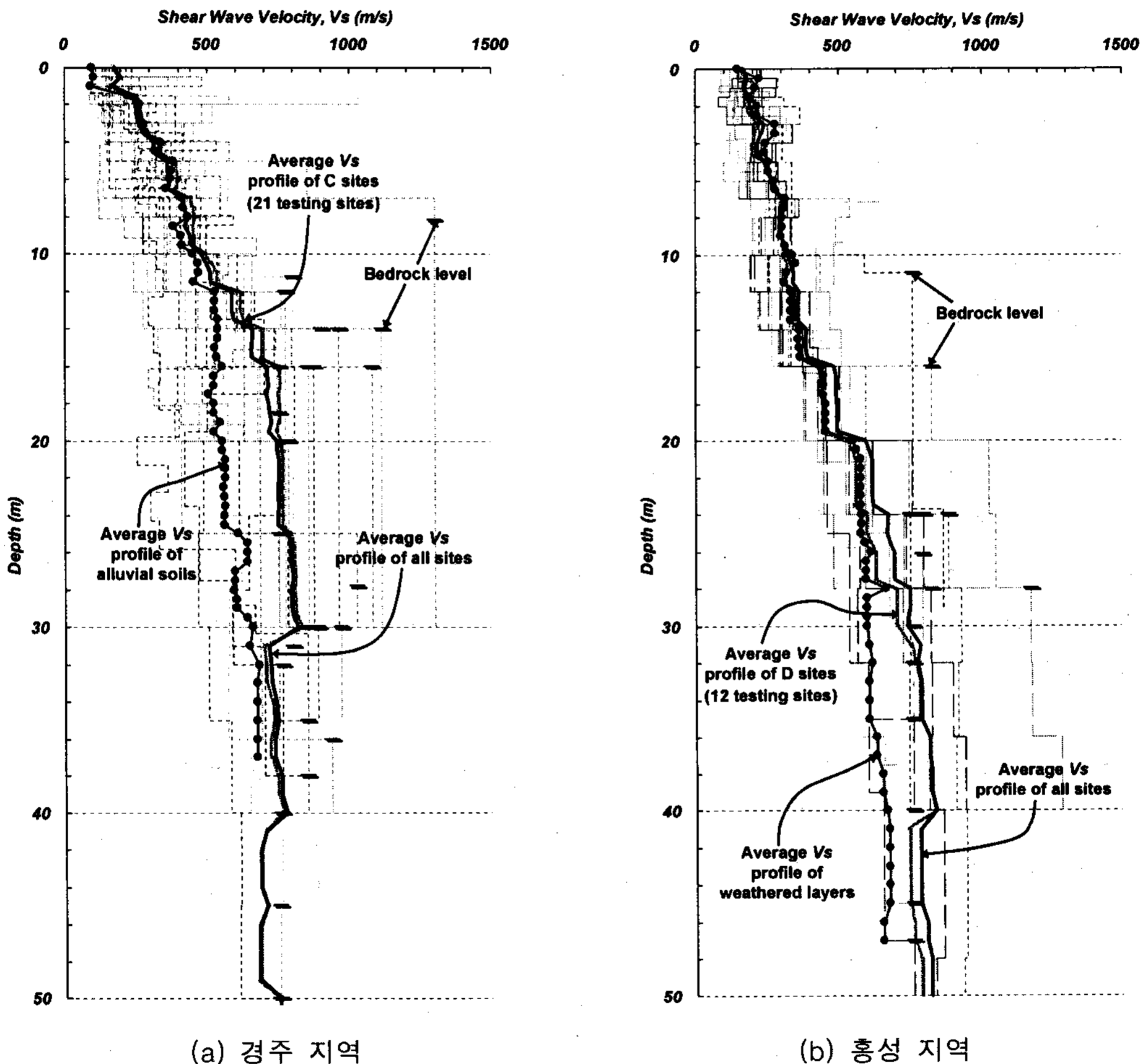


그림 2. 국내 대상 지역별 각 부지의 V_s 및 지반 조건별 평균 V_s 분포

대상 지역별 V_s 분포와 기반암 심도는 그림 2와 같으며, 각 지역별 V_s 분포 특성의 비교를 위하여, 두 지역의 평균적 분류 부지들(경주 지역의 경우 C 분류, 홍성 지역의 경우 D 분류)의 평균과 두 분류 전체의 평균 V_s 분포를 함께 도시하였다. 또한, 지역별 주요 발달 지층인 경주의 퇴적토와 홍성의 풍화 지층에 대한 평균 V_s 도 비교 도시하였다. 그림 1에서 확인한 바와 같이 지역별

로 지배적인 지반 분류가 나뉘에 따라, 경주(그림 2(a))에서는 C 부지들의 평균 V_S 가, 그리고 홍성(그림 2(b))에서는 D 부지들의 평균 V_S 가 전체 부지들의 평균 V_S 와 유사하였고, 상부 심도에서는 지역별 주요 발달 지층의 평균 V_S 와도 대체로 일치하였다.

3.2 대상 지역과 미국 서부지역의 지반 특성 비교

전술한 바와 같이 현행 국내 내진 설계 기준의 지반 분류 체계 및 그에 따른 증폭 계수는 미국 서부 지역(Western US, WUS) 지반 및 지진 조건에서의 경험적 그리고 해석적 연구에 근거한 UBC를 준용하고 있다. 따라서 미국 서부 지역의 지반 특성을 명확히 파악하고, 이를 국내 지반 특성과 비교 분석함으로써, 현행 지반 분류 체계의 국내 지역적 지질 및 지반 조건에 대한 유용성 적절 여부의 판단이 가능하다. 본 연구에서는 이를 위하여 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 자료(Sun, 2004)를 수집 분석하여 국내 대상 지반 특성과 비교하였다. 그림 3은 미국 서부 지역의 V_S 분포와 기반암 심도를 부지별 범례로 나타낸 것이다. 부지명은 프로젝트의 내부 구분 기준에 따라 크게 TS(Targeted Sites)와 UG(USGS Collaborative Sites)로 구분되며, 각 범례의 괄호안 수치는 기반암 심도이고 DT(Deeper Than)는 해당 심도 이상을 의미한다. 또한, 국내 대상 지역 부지들의 평균 V_S 도 도시하여 비교하였다. 그림 3에서 알 수 있는 것처럼, 미국 서부 지역 부지들의 기반암 심도는 대부분 50~300 m (최대 300 m 이상)로서 국내 기반암 심도(최대 50 m 정도)에 비해 매우 깊고, 토사의 V_S , 즉 강성은 상대적으로 작게 나타났다.

제시된 국내 대상 지역(그림 2)과 미국 서부 지역(그림 3) 부지들의 기반암까지의 지층 분포와 V_S 의 분포를 이용하여 식 (6)에 따라 지반의 고유주기(site period, T_G)를 결정하여 지진 응답 특성을 예측할 수 있다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{Si}} \tag{6}$$

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

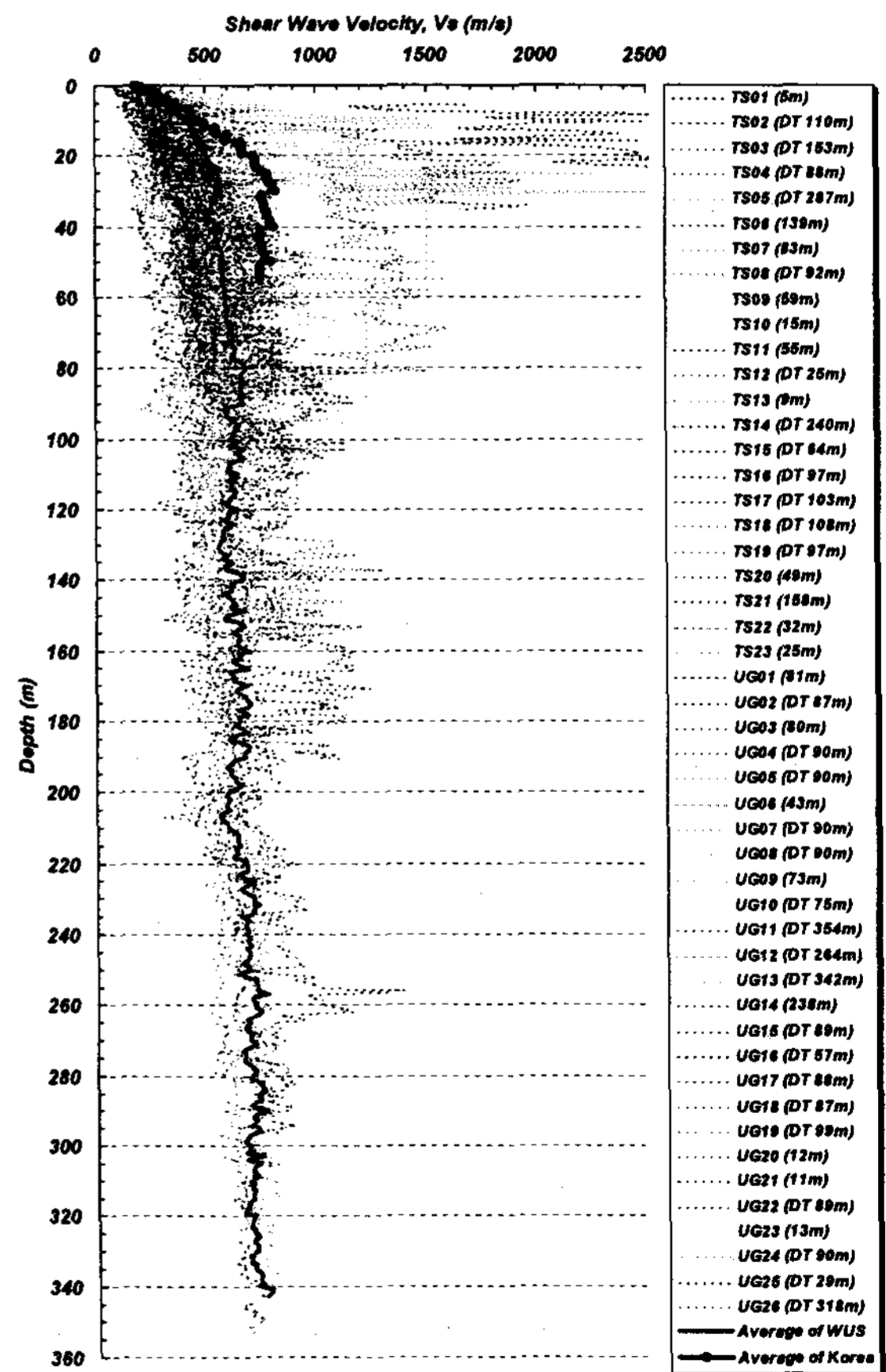


그림 3. 미국서부 지역의 V_S 및 기반암 심도 분포

그림 4에는 부지별 지층 및 V_s 분포를 토대로 선정된 국내와 미국 서부 지역 부지들에 대한 지반 고유주기의 정규 분포를 도시하였다. 국내 내륙 지역 전체의 지반 고유주기는 0.5초보다 작은 0.1~0.4초 정도의 분포를 보였고, 주로 D 부지인 홍성 지역(0.2~0.4초)이 C 부지가 주류인 경주 지역(0.1~0.3초)에 비해 고유주기가 다소 컸다. 반면에 미국 서부 지역은 국내 지역에 비해 매우 깊은 기반암 심도와 다소 연약한 강성을 보이므로 지반 고유주기도 상당히 컸으며, 0.2~1.8초 범위를 보였다. 이와 같은 지반 고유주기 분포로 볼 때, 미국 서부 지역은 장주기 그리고 국내 내륙 지역은 단주기 증폭 특성이 지배적일 것으로 판단된다. 더불어 국내와 미국 서부의 지역적 지반 특성 차이 및 그에 따른 지진 응답의 차이는 국내의 현행 증폭 계수 및 지반 분류 체계의 적용상의 오류를 야기할 수 있다.

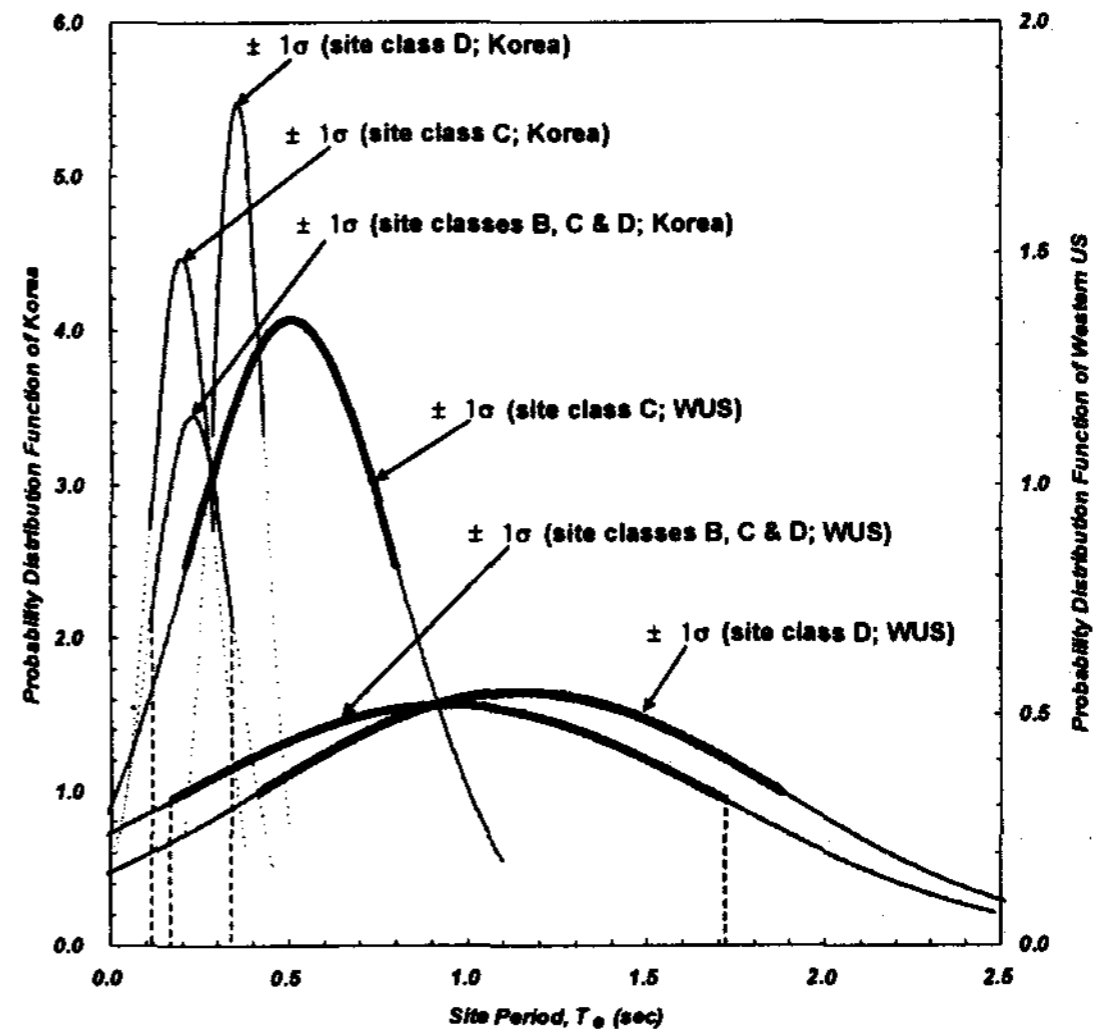


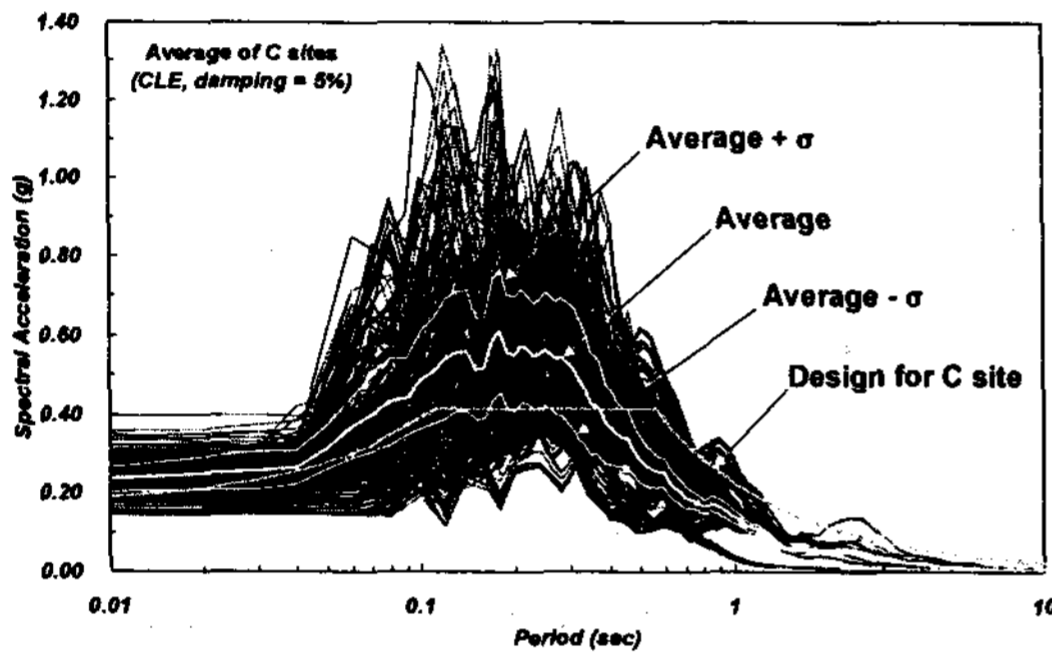
그림 4. 국내 및 미국 서부 지역의 지반 고유주기

4. 부지 응답 해석 및 응답 스펙트럼 분석

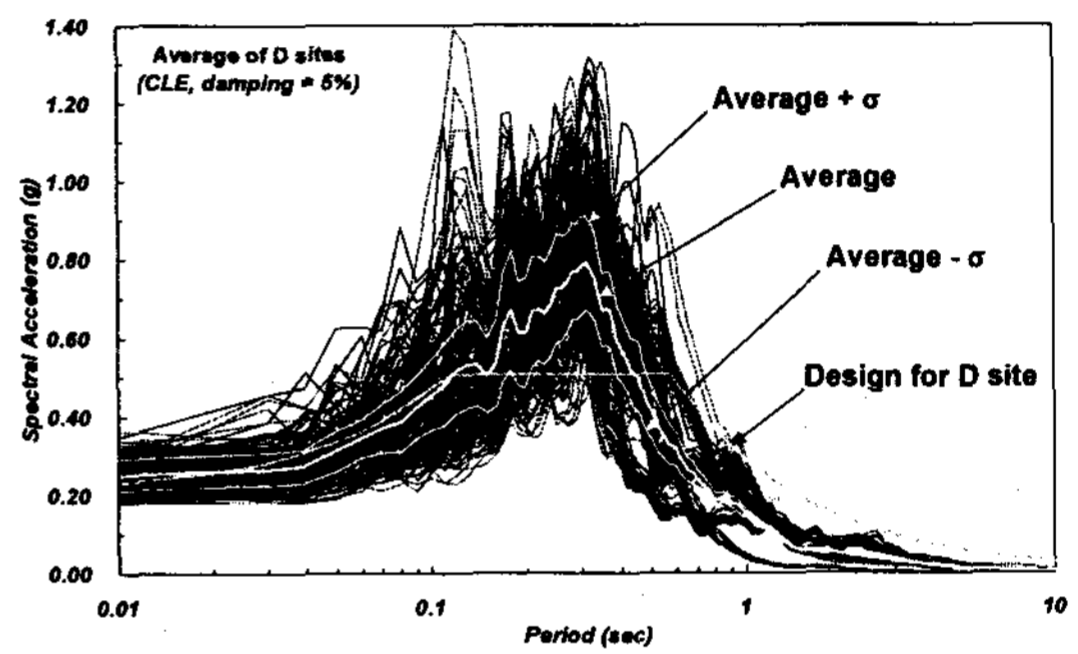
국내 내륙의 경주와 홍성 지역에서 평가된 지층 구성 및 V_s 분포, 그리고 공진주 시험을 통한 정규화 전단계수 및 감쇠비의 비선형 곡선을 토대로 총 44곳의 조사 부지와 경주 지역의 기존 조사 부지중에서 추가 선정된 22곳의 부지를 대상으로 일차원 부지 응답 해석을 수행하였다. 추가 부지에 대한 V_s 의 분포는 본 연구의 공내 탄성과 시험(borehole seismic tests) 결과로부터 도출된 표준 관입 시험의 N 값과 V_s 의 상관관계를 활용하여 경험적으로 산정하였다. 해석은 건설교통부 내진 설계 기준의 1등급 구조물의 붕괴 방지 수준(CLE)과 기능 수행 수준(OLE)에 대한 두 지역의 보통암 노두 가속도 수준을 1000년과 100년 재현주기의 지진재해도로부터 각각 0.14g와 0.05g로 결정하고, 등가 선형 기법의 SHAKE91(Idriss와 Sun, 1992)과 비선형 기법의 NERA(Bardet와 Tobita, 2001)를 모든 부지와 조건에 대해 병용하여 실시하였다. 발생 지진에 대한 다양한 주파수 특성을 반영하기 위하여 해석시 입력 지진은 총 5 종류를 이용하였으며, 강진 지역의 계측 지진파인 El Centro, Hachinohe 및 Ofunato 지진파와 인공 및 경주 지역의 소규모 계측 지진파를 붕괴 방지 수준과 기능 수행 수준의 암반 노두 가속도 수준으로 조절하여 부지 응답 해석을 수행하였다.

등가 선형 및 비선형 기법의 지진 응답 해석으로부터 결정된 지표면 최대 가속도를 붕괴 방지와 기능 수행 수준의 입력 기반암 노두 가속도와 비교해 본 결과, 해석 기법 뿐만 아니라 입력 가속도 수준에도 관계없이 부지별로 그 증폭 정도가 대체로 유사하였으며, 경주 지역에서는 최대 2.4배 그리고 홍성 지역에서는 최대 2.5배 정도까지 가속도가 증폭되었고 전반적으로 평지에 위치한 부지에서 가속도의 증폭이 컸다. 해석 기법과 가속도 수준에 무관한 증폭의 유사성은 해석 가속도 수준이 비교적 낮기 때문에 지반의 발생 변형률이 작았고 이로 인해 흙의 비선형적 거동의

영향이 작았기 때문이다. 그림 5는 각 부지 지표면에서의 구조물 주기별 가속도 응답 스펙트럼중 지반 분류 C와 D 부지의 붕괴 방지 수준에 대한 모든 결과들을 배경으로 평균(Average) 및 평균 \pm 표준편차(Average $\pm\sigma$)를 강조하여 표준 설계 응답 스펙트럼과 함께 도시한 것이다. 국내 내륙 지역의 대표적 지반 분류 조건인 C와 D 부지의 응답 스펙트럴 가속도는 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 지반 고유주기에 상응하는 구조물의 단주기 영역에서 설계 스펙트럴 가속도에 비해 매우 크게 증폭되어 나타났다. 특히, C 부지(그림 5(a))에서는 0.1~0.3초 그리고 D 부지(그림 5(b))에서는 0.1~0.4초 범위에서 증폭이 크게 발생한 반면, 중장주기 영역에서는 두 지반 분류 조건 모두에서 응답 스펙트럼이 대체로 설계 스펙트럼보다 작게 나타났다. 그러나 본 연구 대상 부지중 극히 일부에 해당하는 지반 분류 B의 경우 전반적으로 해석으로부터 결정된 부지의 응답 스펙트럼과 표준 설계 스펙트럼이 유사한 경향을 보였다. 전체적인 지반 분류 조건별 부지의 응답 특성의 경향은 기능 수행 수준도 붕괴 방지 수준과 일치하였다.



(a) 지반 분류 C 부지



(b) 지반 분류 D 부지

그림 5. 국내 대상 지역의 붕괴 방지 수준에 대한 지반 분류 C 및 D 부지의 응답 스펙트럼

국내 내륙의 해석 대상 부지들의 지반 분류(B, C, D)별 평균 응답 스펙트럼과 B, C, D 및 E 지반 분류에 대한 표준 설계 응답 스펙트럼의 전반적인 그리고 선명한 비교를 위하여 그림 6에 붕괴 방지 수준의 결과를 도시하였다. C와 D 부지의 경우 설계 응답 스펙트럼에 비해 단주기(0.1~0.5초) 구간에서는 크게 증폭되고 중장주기(0.4~2.0초)에서는 작은 부지 응답 스펙트럼을 확인할 수 있다. 특히, 지반 고유주기 구간(0.1~0.4초) 내에서는 C와 D 부지 응답 스펙트럴 가속도가 각각 증폭이 더 클 것으로 간주되는 다음 단계의 지반 분류 D와 E의 설계 스펙트럴 가속도보다도 더 크게 나타났다. 이와 같은 부지 응답 스펙트럼과 설계 응답 스펙트럼의 차이 개선을 위하여 기반암 노두대 지표면 응답 스펙트럼 비에 기반한 식 (3)과 식 (4)에 따라 각 부지의 단주기와 중장주기 증폭 계수, F_a 와 F_b 를 산정하고 V_{s30} 과 같은 지반 특성과의 비교 분석을 수행하였다.

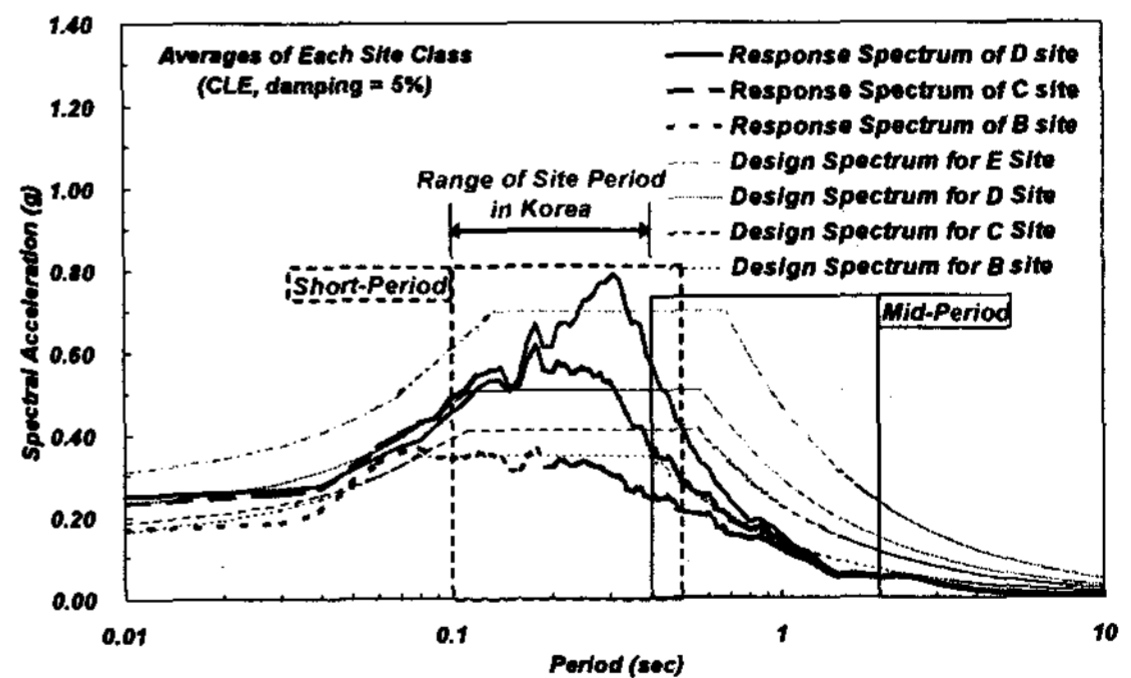
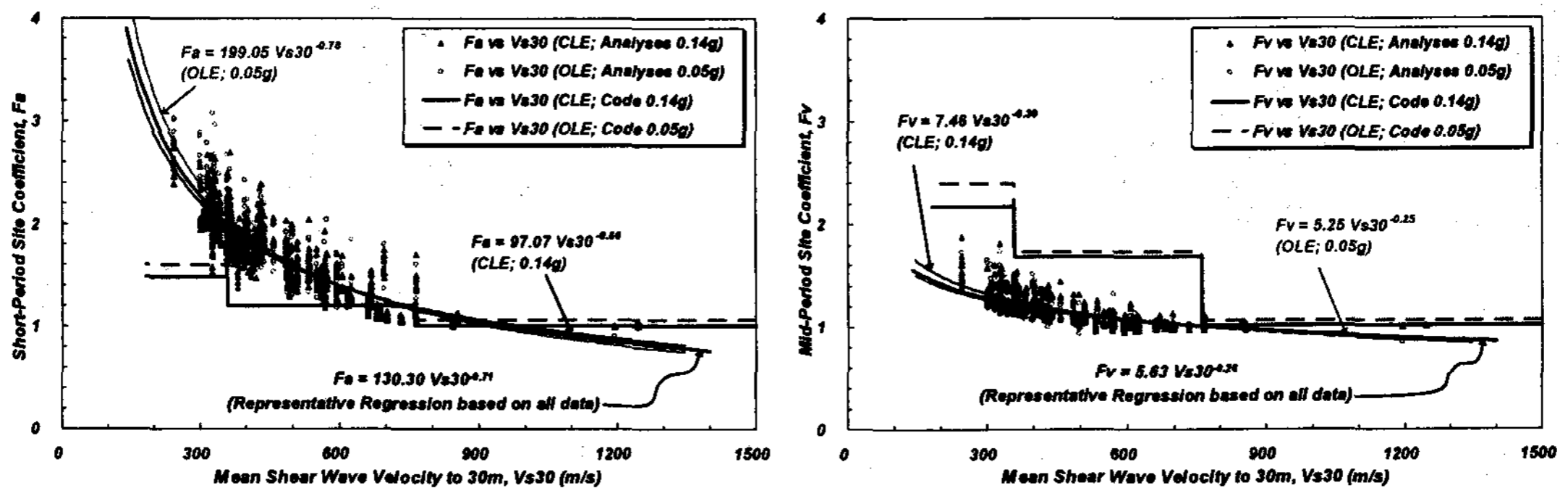


그림 6. 국내의 지반 분류별 평균 응답 스펙트럼 및 표준 설계 응답 스펙트럼(붕괴 방지 수준)

5. 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계

지역적 지질 및 동적 응답 특성을 고려한 국내 내륙 지역의 합리적 증폭 계수의 결정과 지반 분류 체계의 개선을 목적으로, 경주와 홍성의 해석 대상 부지들에서의 등가 선형 및 비선형 응답 해석 결과인 가속도 스펙트럼을 이용하여 단주기 증폭 계수 F_a 와 중장주기 증폭 계수 F_v 를 산정하였다. 그림 7은 각 부지의 증폭 계수와 V_{s30} 과의 관계이며, 현행 지반 분류 체계의 증폭 계수(표 1 참조)와 함께 비교 도시하였다. Borchardt(1994)에 의해 이미 알려진 바와 같이 V_{s30} 의 증가에 따라 증폭 계수는 비선형적으로 감소함을 확인할 수 있고, 본 연구에서 고려된 두 종류의 암반 노두 가속도 수준(0.14g와 0.05g)이 낮으므로 두 수준간 증폭 계수 값의 차이는 비교적 미미했다. 두 가속도 수준을 종합한 대표 관계 곡선을 각 수준의 관계 곡선과 더불어 제시하였다. 산정된 국내 내륙 지역의 증폭 계수와 현행 국내 내진 설계 기준의 증폭 계수를 비교해 볼 때, 지역적 지반 응답 특성의 차이로 인해 현재 국내 기준의 F_a (그림 7(a))는 지반 운동을 과소평가하고 F_v (그림 7(b))는 과대평가한다.



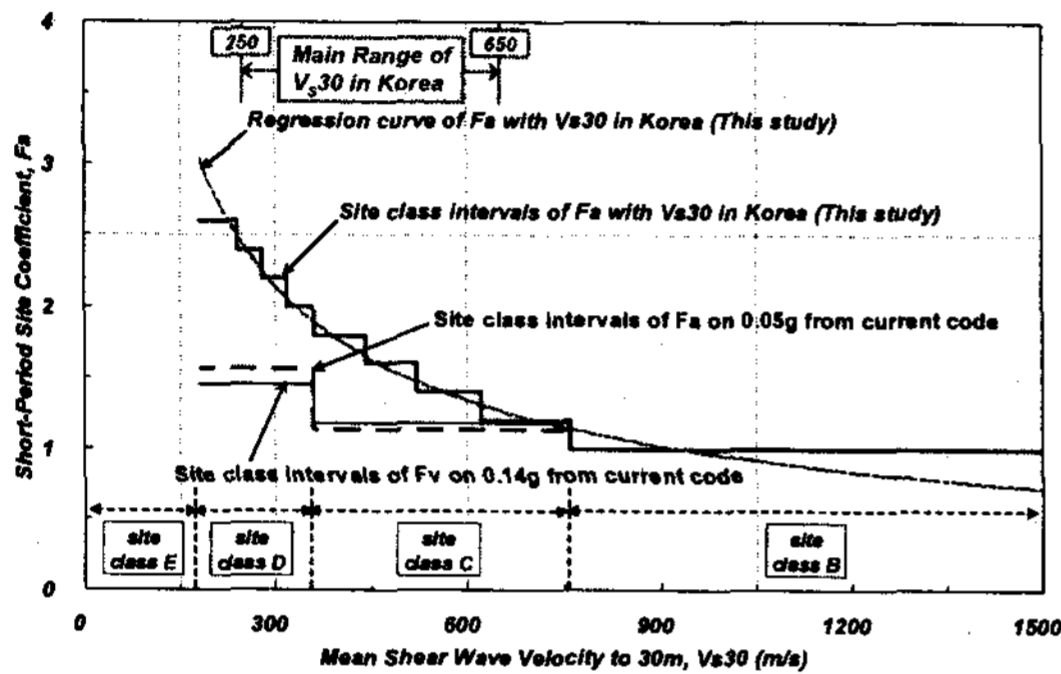
(a) 단주기 지반 증폭 계수, F_a

(b) 중장주기 지반 증폭 계수, F_v

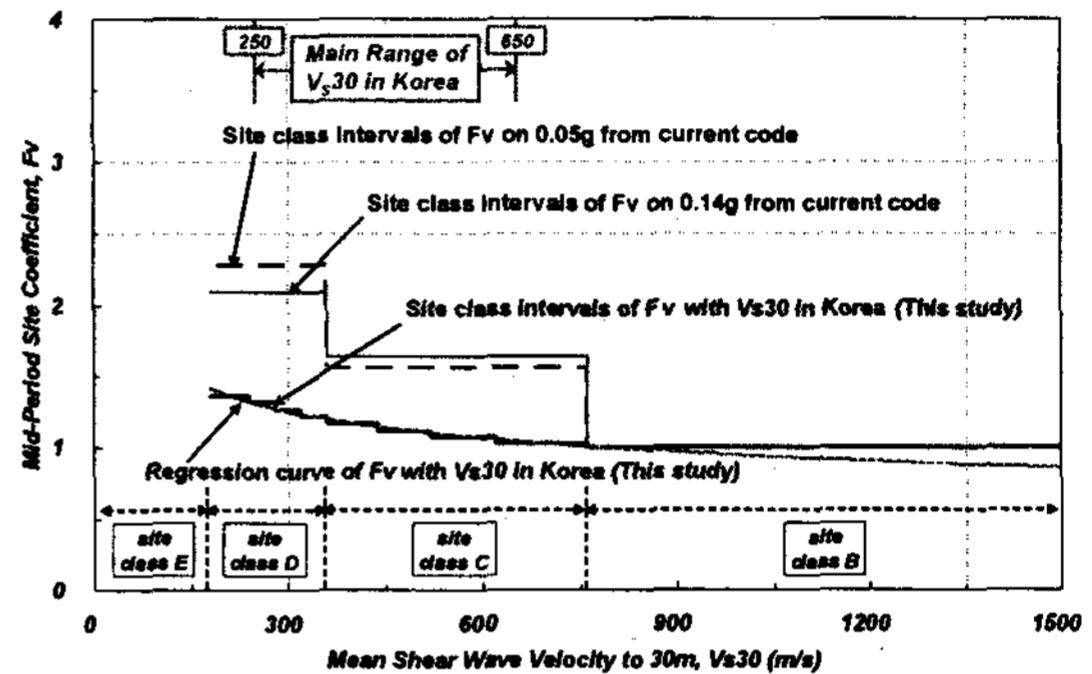
그림 7. 국내 내륙 지역의 V_{s30} 에 따른 지반 증폭 계수 및 현행 지반 분류 체계

부지의 지진 응답 특성은 주로 기반암 상부 토사의 지질 및 동적 특성에 의해 좌우되며, 그 중에서도 지표면 부근 지반 조건의 영향이 지배적이다(Sun, 2004). 지표 지질과 지반 증폭 정도의 상관성에 따라 Borchardt(1994)는 기반암 심도가 100~300 m 정도로 깊은 미국 서부 지역 부지들에 대해서 일반적인 지반 조사 수행 심도이자 상대적으로 얇은 심도인 30 m(100 ft)까지 V_s 의 조화 평균을 지반 분류 기준으로 제시하였다. 그러나 국내 내륙 지역은 기반암 심도가 최대 50 m 정도로 대부분 미국 서부 지역에 비해 매우 얇으며, 대부분의 인간 활동 부지가 지반 분류 C와 D에 해당될 뿐만 아니라 V_{s30} 도 두 분류의 경계 부근에 밀집된 매우 좁은 범위를 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 국내 내륙 지역에 대해 합리적으로 재산정된 F_a 및 F_v 와 V_{s30} 의 관계(그림 7)를 토대로 현재 적용되는 설계 기준내 6 종류의 지반 조건중 B, C 및 D의 3 종류 지반 분류를 개선하고자 하였다. 현행 증폭 계수와 비교해 볼 때, 국내 내륙 지역에서는 단주기의 F_a 는 크게 F_v 는 작게 조정됨이 타당하다. 또한, 향후 추가적인 자료의 수집이나 계측 사례의 검증을 통해 V_{s30} 과 두 증폭 계수의 상관관계식을 보완할 필요가 있겠지만, 본 연구에서는 일단 현재 자료의

결과를 보여주는 그림 7의 관계식을 근거로 지반 분류 C와 D에 대해 각각 상세한 세부 분류를 추가 적용하여 좁은 범위의 V_{s30} 에 따른 지반 증폭 계수의 부지별 차이를 감소시킴으로써 내륙 지역에 대한 지반 분류 체계를 합리화 하였다. 그림 8은 국내 내륙 지역의 부지 응답 해석 결과에 따라 결정된 V_{s30} 과 지반 증폭 계수의 상관관계를 토대로 지반 분류 C와 D에 대한 세부 분류의 작성 과정을 기존 지반 분류의 증폭 계수와 비교하여 도시한 것이다. C와 D의 지반 분류 내에는 각각 네 단계의 세부 분류를 적용함으로써, 국내 내륙 지역의 V_{s30} 범위 내에서 C와 D 분류 경계인 360 m/s에서만 증폭 계수의 단일 변화 대신 단계적 변화를 통해 국내 내륙 지역의 지반 증폭 계수를 V_{s30} 에 따라 합리적으로 결정할 수 있도록 지반 분류 체계를 개선하였다.



(a) 단주기 지반 증폭 계수, F_a



(b) 중장주기 지반 증폭 계수, F_v

그림 8. 국내 내륙 지역에서의 V_{s30} 에 따른 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계의 개선

현행 국내 지반 분류 체계의 근간인 미국 서부 지역의 지질 및 지반 특성과는 달리 국내 내륙 지역은 토사의 강성이 다소 크고 기반암의 심도가 얇다. 이러한 국내의 기반암 심도 분포 특성을 고려해 볼 때, 보다 효율적인 지반 분류 기준으로 30 m에 비해 얇은 심도의 평균 V_s 도 유용할 것으로 보이며, 그림 9에서 제시한 것처럼 기존 지반 분류 기준인 V_{s30} 과 본 연구에서 새롭게 제안할 V_{s20} , V_{s15} 및 V_{s10} 의 높은 상관성을 확인하였다. 이와 같은 지표면 부근의 얇은 심도까지의 지반 동적 특성을 이용하여 지진시의 지반 증폭 계수를 결정할 수 있게 되면,

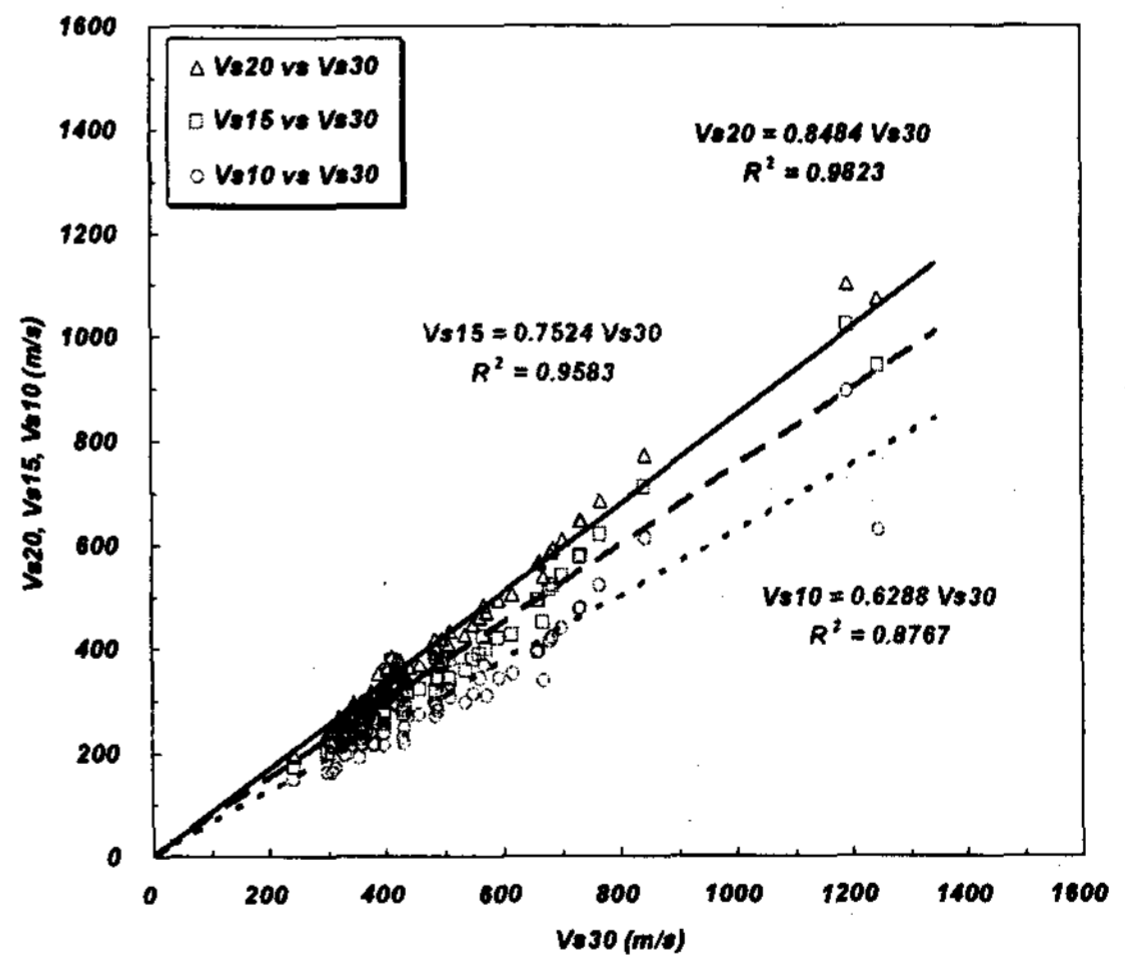
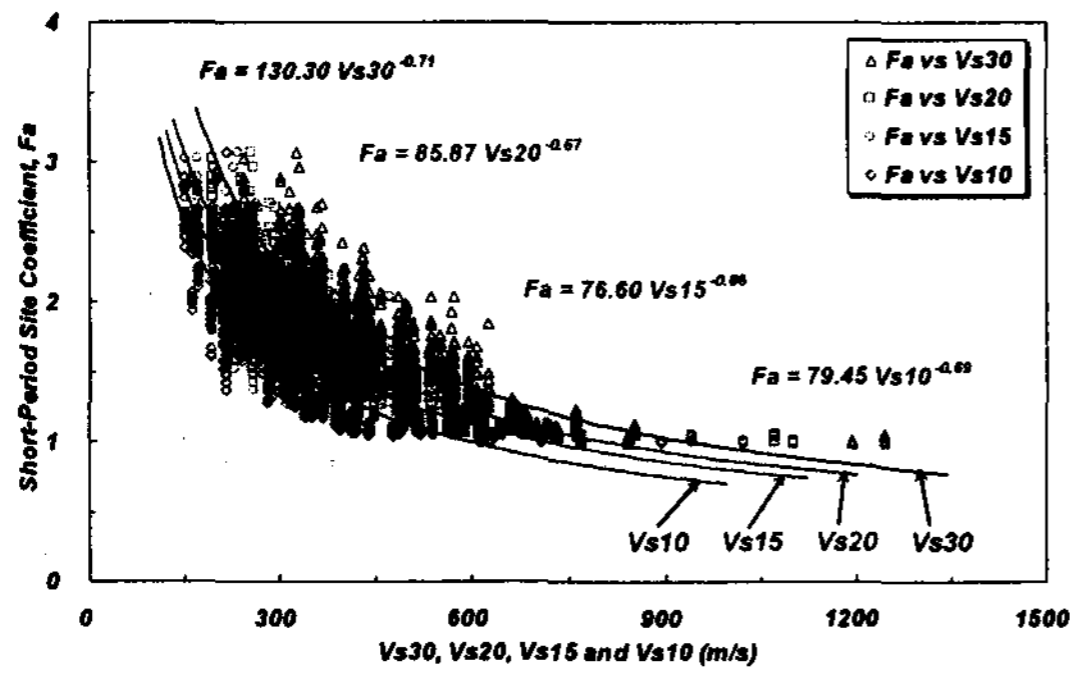
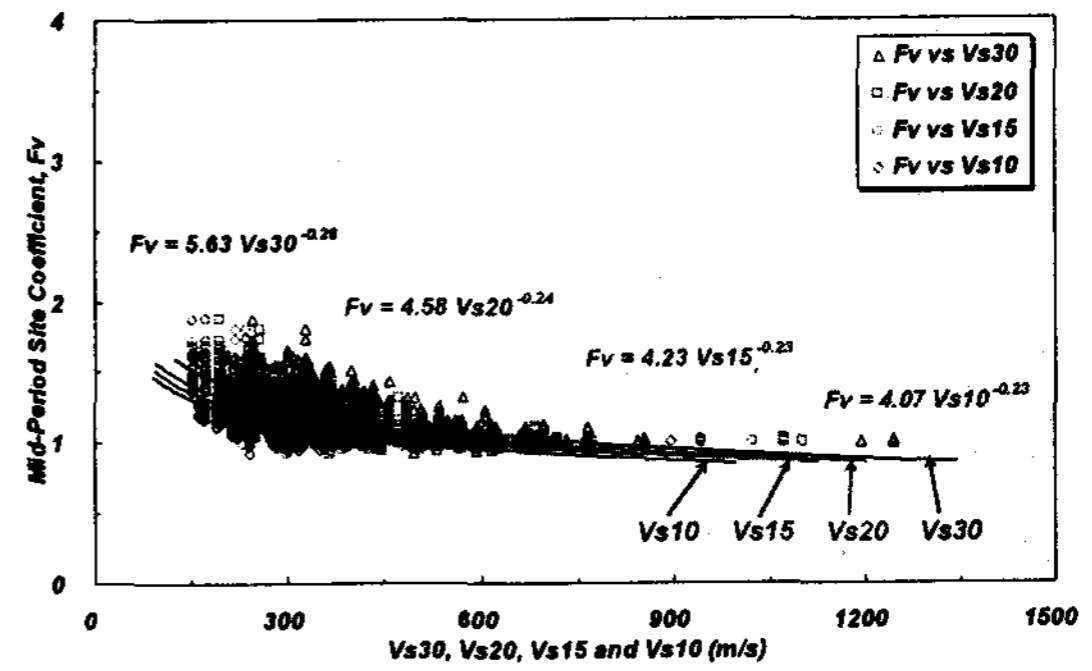


그림 9. V_{s30} 과 V_{s20} , V_{s15} 및 V_{s10} 의 관계

동적 특성 결정을 위한 현장 조사의 효율성과 기존의 제한적인 조사 자료의 활용성도 극대화시킬 수 있다. 위에서 기존 지반 분류 기준인 V_{s30} 에 대해 묘사한 방법에 따라 추가적인 기준인 V_{s20} , V_{s15} 및 V_{s10} 을 도입하고, 국내 내륙 지질 조건을 고려한 지반 분류 체계를 제시하기 위하여 그림 10과 같이 본 연구의 해석 결과를 토대로 F_a 및 F_v 의 다양한 상관관계를 도출하였다.



(a) 단주기 지반 증폭 계수, F_a



(b) 중장주기 지반 증폭 계수, F_v

그림 10. 국내 내륙 지역에서의 다양한 평균 V_s (V_{s30} , V_{s20} , V_{s15} , V_{s10})에 따른 지반 증폭 계수

새롭게 제시된 V_{s20} , V_{s15} 및 V_{s10} 의 분류별 경계는 V_{s30} 의 지반 증폭 계수를 기준으로 동일 값에 해당되게 설정하였다. 표 2는 본 내용에서 묘사된 지반 분류 개선 방안 및 과정을 토대로 재구성된 국내 내륙 지역에서의 증폭 계수 결정을 위한 지반 분류 체계로서, 현행 분류 체계와는 달리 V_{s30} 외의 추가적인 V_{s20} , V_{s15} 및 V_{s10} 이 기준으로 제시되어 있다 할지라도 지반 특성의 상세한 평가가 보다 합리적이므로 평균 V_s 의 결정시 그 우선순위는 30 m부터 20 m, 15 m, 그리고 10 m가 적합하다. 또한, 지반 분류 C와 D에서 이미 언급하여 제시된 네 단계의 세부 분류와 더불어 각 세부 분류의 경계 부근에서는 평균 개념의 중간 분류를 적용하였으며, 현재의 지반 분류 표현 역시 국내 지반의 일반적인 상황적 명칭을 토대로 재구성하였다. 표 2의 지반 조건별 증폭 계수에 따라 지진 계수를 산정하고 표준 설계 응답 스펙트럼을 결정할 수 있다. 제시된 표 2의 국내 내륙 지역에 대한 지반 분류 체계는 다양한 부지 특성의 평가와 국내 예측 지진 기록의 고찰에 기반한 지속적 보완 및 개선을 통해 궁극적인 확립이 가능할 것으로 판단된다.

표 2. 국내 내륙 지역의 합리적 증폭 계수 결정을 위한 지반 분류 체계

Generic Description	Site Class*	Criteria; Mean V_s (m/s)				Site Coefficients		
		1st	2nd	3rd	4th	F_a	F_v	
		V_{s30}	V_{s20}	V_{s15}	V_{s10}			
Rock	B	> 760	> 650	> 580	> 490	1.00	1.00	
Weathered Rock and Very Stiff Soil	C	C1	620~760	530~650	470~580	400~490	1.20	1.03
		C2	520~620	450~530	400~470	340~400	1.40	1.07
Intermediate Stiff Soil	C	C3	440~520	380~450	340~400	290~340	1.60	1.12
		C4	360~440	310~380	280~340	240~290	1.80	1.17
Deep Stiff Soil	D	D1	320~360	280~310	250~280	210~240	2.00	1.22
		D2	280~320	240~280	220~250	190~210	2.20	1.27
		D3	240~280	210~240	190~220	160~190	2.40	1.32
		D4	180~240	160~210	140~190	120~160	2.60	1.37

* If the criteria of the mean V_s is distributed near the boundary value, the intermediate site classes, BC1(or C1B), C12(or C21), C23(or C32), C34(or C43), C4D1(or D1C4), D12(or D21), D23(or D32), and D34(or D43) can be adopted based on engineering judgement. In these cases, the site coefficients must be determined as the average value of two categories.

6. 결론

국내 내륙의 대표적인 두 지역인 경주와 홍성을 대상으로 다양한 지반 조사를 수행하여 지질 조건 및 동적 특성을 평가하였다. 특히, 지반 분류 기준인 V_{s30} 은 주로 지반 분류 C와 D의 경계 부근에 밀집되어 250~650 m/s의 좁은 분포 범위를 보였다. 파악된 지반 특성을 현행 국내 내진 설계 기준의 근간인 미국 서부 지역의 특성과 비교해 본 결과, 국내 내륙 지역은 미국 서부 지역에 비해 기반암 깊이는 얇고 토사 강성은 컸으며, 지반 고유주기는 0.1~0.4초로서 미국 서부의 0.2~1.8초에 비해 매우 작았다. 대상 지역내 66부지에 대한 지반 응답 해석 결과로부터 고유주기 부근의 큰 증폭을 확인하였고, 국내 내륙 지반 운동에 대한 현행 단주기(0.1~0.5초) 증폭 계수 F_a 의 과소평가와 중장주기(0.4~2.0초) 증폭 계수 F_b 의 과대평가 경향을 확인하였다. 이러한 응답 해석 결과를 토대로 국내 내륙 지역에 대한 지반 증폭 계수를 재산정하고, 지역적 지질 조건과 동적 특성을 고려하여 기존 지반 분류 C와 D의 세부 분류와 지표면 부근 심도까지의 평균 V_s 인 V_{s20} , V_{s15} 와 V_{s10} 의 추가 분류 기준을 제안함으로써 지반 분류 체계를 합리적으로 개선하였다.

감사의 글

본 연구는 한국 원자력 안전기술원, 한국 지진공학 연구센터와 (주)도화지질의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

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. BSSC, "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures", Part 1-Provisions, Building Seismic Safety Council, Washington D. C., 2000.
3. 건설교통부, "내진설계기준연구(II)", 1997.
4. 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.
5. Borchardt, R. D., "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)", Earthquake Spectra, Vol. 10, 1994, pp. 617-653.
6. ICBO, "1997 Uniform Building Code, Volume 2 - Structural Engineering Design Provisions", International Conference of Building Officials, 1997.
7. 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.
8. Bardet, J. P., and Tobita, T., "NERA: A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits", University of Southern California, 2001.