

얕은 심도 전단파속도 분포를 이용한 30m 심도 평균 전단파속도의 결정

Determination of Mean Shear Wave Velocity to the Depth of 30m Based on Shallow Shear Wave Velocity Profile

선창국¹⁾ · 정충기²⁾ · 김동수³⁾

Sun, Chang-Guk · Chung, Choong-Ki · Kim, Dong-Soo

국문 요약 >> 미국 서부 지역을 근간으로 도출된 30m 심도까지의 평균 전단파속도(V_{s30})는 부지 증폭 정도에 따른 설계 지진 지반 운동 결정을 위한 현행 지반 분류 기준이다. 부지의 V_{s30} 을 산정하기 위해서는 현장 탄성파 시험으로부터 적어도 30m 심도까지의 전단파속도(V_s) 분포를 획득해야 한다. 그러나 많은 경우에서 현장의 불리한 여건 및 적용 시험 기법의 제한으로 인해 V_s 분포 결정 심도가 30m에 이르지 못할 수 있다. 본 연구에서는 국내 총 72개소 부지들에서 다양한 탄성파 시험 수행을 통해 30m 이상 심도까지 V_s 분포를 획득하여 V_{s30} 과 30m보다 얕은 심도까지의 평균 전단파속도(V_{sDs})들을 산정하고, 이로부터 V_{s30} 과 V_{sDs} 간의 상관관계를 도출하였다. 또한, 모든 V_s 분포 자료의 평균에 근거한 형상 곡선을 작성하여 V_s 분포를 얕은 심도부터 30m까지 외삽할 수 있는 기법을 개발하였다. 얕은 심도 V_s 분포로부터의 V_{s30} 산정을 위하여 V_{sDs} 와 형상 곡선을 이용하는 두 기법은 최하단 V_s 를 30m 심도까지 동일하게 연장하는 단순 기법에 비해 편향 정도가 적었으며, 특히 최소 10m 이상 심도까지 확보된 V_s 분포의 경우 유용하게 적용될 수 있을 것으로 보인다.

주요어 지반 분류, 평균 전단파속도, 탄성파 시험, 30m 미만 얕은 심도, 기반암 심도

ABSTRACT >> The mean shear wave velocity to the depth of 30 m (V_{s30}) derived from the western US is the current site classification criterion for determining the design seismic ground motion taking into account the site amplification potential. In order to evaluate the V_{s30} at a site, a shear wave velocity (V_s) profile extending to at least 30 m in depth must be acquired from in-situ seismic test. In many cases, however, the resultant depth of the V_s profile may not extend to 30 m, owing to the unfavorable field condition and the limitation of adopted testing techniques. In this study, the V_{s30} and the mean shear wave velocity to a depth shallower than 30 m (V_{sDs}) were computed from the V_s profiles more than 30 m in depth obtained by performing various seismic tests at total 72 sites in Korea, and a correlation between V_{s30} and V_{sDs} was drawn based on the computed mean V_s data. In addition, a method for extrapolating the V_s profile from shallow depth to 30 m was developed by building a shape curve based on the average data of all V_s profiles. For evaluating the V_{s30} from the shallow V_s profiles, both the methods using V_{sDs} and shape curve result in less bias than the simplest method of extending the lowermost V_s equally to 30 m in depth, and are usefully applicable particularly in the cases of the V_s profiles extending to at least 10 m in depth.

Key words site classification, mean shear wave velocity, seismic test, depth shallower than 30 m, bedrock depth

1. 서론

구조물의 내진 설계 및 내진 성능 평가 과정에서 가장 기

본적인 단계는 바로 구조물에 작용하는 지진 지반 운동(earthquake ground motion)의 결정이다. 지진 지반 운동은 구조물의 내진 성능 수준에 따라 지역별 지진 재해 정도로 구분된 기준 지진 운동을 토대로 결정할 수 있다. 보통암 노두 조건으로 설정되어 있는 기준 지진 운동은 해당 부지의 지반 조건에 따른 증폭 정도 별로 구분되고, 비로소 부지의 지진 지반 운동의 결정이 이루어진다.⁽¹⁾ 즉, 기반암(bedrock)에 도달한 지진동은 그 상부의 토사층을 통과하면서 부지별 고유의 지질 조건 및 지반 동적 특성과 관련된 부지 효과(site effects)

¹⁾ 정회원·한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원
(대표지자: pungsun@kigam.re.kr)

²⁾ 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

³⁾ 정회원·한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 9. 6 / 심사종료일 : 2006. 10. 25)

에 따라 특정 주기 부근에서 증폭 또는 감쇠되어 지표면에서의 지진 지반 운동으로 표출된다. 부지 고유의 특성은 전단파속도(shear wave velocity, V_s)로 대표될 수 있으며, 현행 내진 설계 기준들⁽²⁻⁶⁾에서는 부지 특성 조건의 구분 지표로 지표면부터 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V_{s30})를 제시하고 있다. 부지 효과를 정량화한 지반 증폭 계수(site coefficients)는 V_{s30} 에 따라 구분되어 있는 지반 분류 체계(site classification system)로부터 결정할 수 있다. 따라서 지역적 위치에 따라 선정된 기준 지진 운동과 국부적 부지 조건에 따라 결정된 지반 증폭 계수의 조합을 통해 구조물의 설계 지진 지반 운동을 산정하게 된다. 이러한 일련의 과정에서 가장 중요한 요소가 부지에서 깊이 따른 전단파속도(V_s) 분포이다.

지반 동적 특성 평가 및 그에 따른 부지 효과 평가의 일환으로 해외에서는 V_s 분포의 합리적 결정을 위한 현장 탄성과 시험 기법들이 개발되어 왔으며, 최근 국내에서도 기존 기법의 도입·활용과 더불어 국내 현장 여건을 고려한 기법 개선 및 장비 개발이 이루어 지고 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 실제, 현장에서 이러한 탄성과 기법들을 통해 V_s 를 평가하고자 할 경우, 현행 내진 설계 기준의 V_{s30} 을 결정하기 위해서는 최소 30m까지의 V_s 분포가 확보되어야 한다. 그러나 현장에서 소정 심도까지의 시험 수행 과정 중에는 불완전한 시험 환경 조성으로 인한 방해 변수가 존재할 수 있다. 뿐만 아니라 선정된 현장 시험 기법 및 장비에 따라 특정 지반 조건과 특정 심도 범위에서는 그 적용성이 제한적일 수 있다.^(5,9) 특히, 최근 지반 조사 기법들의 복합적 적용을 통한 지반 특성의 종합 결정을 위하여 기존의 현장 탄성과 기법 이외의 하이브리드 현장 시험 기법(hybrid in-situ testing technique)인 탄성과 피에조콘 관입 시험(seismic piezocone penetration test, SCPTu)이나 탄성과 dilatometer 관입 시험(seismic dilatometer test, SDMT) 등의 수행이 급속도로 활성화되고 있으며⁽¹⁰⁾, 이를 통한 V_s 획득의 경우 관입 시험의 조건상 적용 심도의 제한적 상황은 상존하게 된다.

이와 같은 복합적 이유로 인해 현장 탄성과 시험으로부터 구한 국내의 V_s 분포 자료 중에는 지표면부터 30m 이상까

지 그 값이 완전히 결정되지 못한 자료가 종종 발견된다.⁽³⁾ 국내뿐만 아니라 미국이나 일본과 같은 해외에서도 30m까지의 전체 V_s 분포가 확보되지 못한 자료는 매우 광범위하게 산재되어 있다.⁽¹¹⁾ 현행 내진 설계 기준에 근거한 지진 지반 운동을 결정하기 위해서는 지반 분류 기준 변수인 V_{s30} 의 산정이 요구되므로, 이러한 30m 미만 얕은 심도 분포 자료들은 활용 가치를 상실할 수 있다. 본 연구에서는 30m 심도까지의 V_s 분포가 확보되지 못하여 현행 내진 설계 기준 토대의 지반 분류가 불가능한 자료들을 내진 설계나 내진 성능 평가 목적으로 활용할 수 있는 방안을 제시하고자, 본 연구진에서 국내 부지들을 대상으로 실제 수행한 현장 탄성과 시험 자료들을 분석하였다. 분석 결과로부터, 30m에 미치지 못하는 얕은 심도까지의 V_s 분포 자료의 활용 방안으로, 현행 지반 분류 기준인 V_{s30} 과 30m 미만 심도까지의 평균 V_s 의 상관관계를 제시하였다. 더불어, 얕은 심도까지만 제한적으로 분포하는 V_s 를 30m 심도까지 외삽(extrapolation)하기 위한 기법도 제시하였다.

2. 부지 효과의 정량적 구분을 위한 지반 분류 체계 및 분류 기준

지진시 경험하는 지표면 부근 지진동의 크기 및 형태는 진원이나 진앙으로부터 동일 거리의 부지들 일지라도 해당 부지 기반암까지의 전파 경로뿐만 아니라 부지 효과와 관련된 기반암부터 지표면까지 구성 토사의 V_s 분포와 같은 동역학적 특성에 따른 응답 거동 차이로 크게 달라질 수 있다. 이와 같은 부지의 지진 응답 특성은 주기별 가속도나 속도 등으로 표출되는 지진동의 크기 거동을 의미하며, 지표면 부근 구조물의 동적 응답에 직접적인 영향을 미치게 된다. 부지 효과에 따른 지진동의 증폭을 정량적으로 고려하기 위하여 현행 국내 내진 설계 기준⁽³⁾에서는 표 1에 제시된 바와 같이 V_{s30} (또는 \bar{V}_s)에 따라 지반을 5 종류로(A~E 또는 S_A ~ S_E)로 분류하여 적용하고 있다.^(12,13) 더불어 지반 특성이 지진공학적으로 매우 불리할 경우(F 또는 S_F)에는 추가적인 부지 특성 평가를 요구하고 있다.

〈표 1〉 현행 국내 내진 설계 기준의 지반 분류 체계

Site Class (Soil Profile Type)	Generic Description	Mean V_s of top 30 m, V_{s30} (m/s)
A (S_A)	Hard Rock	$1,500 < V_{s30}$
B (S_B)	Rock	$760 < V_{s30} \leq 1,500$
C (S_C)	Very Dense Soil and Soft Rock	$360 < V_{s30} \leq 760$
D (S_D)	Stiff Soil	$180 < V_{s30} \leq 360$
E (S_E)	Soft Soil	$V_{s30} \leq 180$
F (S_F)	Requires site-specific evaluation	

현행 국내 지반 분류 기준은 표 1에 소개된 V_{S30} 외에도 심도 30m까지의 평균 N 값 및 비배수 전단강도도 포함하고 있으나, 그 활용성은 매우 제한적이다. 본래 V_{S30} 은 지하 100ft(30.48m)까지의 평균 V_S 를 의미하며, Borcherdt⁽¹⁴⁾가 1989년 미국 서부에서 발생한 Loma Prieta 지진의 관측 기록과 그 부지들의 지반 특성을 분석하여 단주기(0.1~0.5 초) 및 중장주기(0.4~2.0 초) 지반 증폭 계수인 F_a 및 F_v 의 분류 기준으로 제시한 것이다. 이러한 지반 분류 기준과 지반 증폭 계수는 NEHRP⁽⁴⁾ 규정과 ICBO⁽²⁾의 UBC(Uniform Building Code)에서 채택되었고, 이를 다시 국내 내진 설계 기준⁽³⁾에 반영한 것이다.⁽⁵⁾ 근본적으로 30m(100ft)는 지진학적 관점에서는 매우 얕은 심도로 간주될 수 있으나, 기반암 심도(depth to bedrock, H)가 매우 깊은 미국 서부 지역에서의 일반적인 시추 및 상세 지반 조사 심도이다.^(15,16) 지표면 부근 얕은 심도의 지질 조건 및 지반 동적 특성이 부지 고유의 지진 응답에 매우 큰 영향을 미치므로^(17,18), 30m 심도까지 지반 특성의 평균적 반영 지표인 V_{S30} 은 지진공학 측면에서 유용하다고 할 수 있다. V_{S30} 은 식 (1)과 같이 결정할 수 있으며, 수식적으로는 산술 평균이 아닌 기하 평균을 의미한다.

$$V_{S30} = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{Si}}} \quad (1)$$

여기서, d_i 와 V_{Si} 는 각각 지하 30m까지 분포하는 i 번째 지층의 두께($\sum d_i=30m$)와 V_S

아래 식 (2)에서 표현된 $V_{S30\text{arithmetic}}$ 도 지하 30m까지의 평균 V_S 이지만, 산술 평균을 의미한다. 자연 상태의 지반 조건에서는 거의 모든 경우에 V_S 30이 $V_{S30\text{arithmetic}}$ 보다 작게 결정된다.

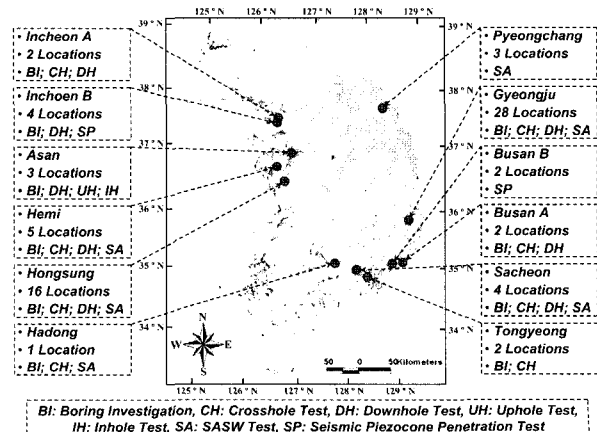
$$V_{S30\text{arithmetic}} = \left\{ \sum_{i=1}^n V_{Si} \times d_i \right\} / 30 \quad (2)$$

V_{S30} 은 실제 지진시 전파 현상을 고려하여 결정한 심도 30m까지의 평균적인 V_S 로서, 우선 지하 30m 심도부터 지표면까지의 다양한 지층을 통과해 전달되는 전단파의 전파 시간($\sum(d_i / V_{Si})$)을 계산하고, 이를 분모로 하여 분자인 전파 경로 길이 30m를 나누는 계산 과정으로 결정하게 된다. 일반적으로 지반공학 관점의 대표적 지반 동적 특성으로서 흙입자를 통해 전파되는 V_S 가 활용되어 왔다.⁽¹⁵⁾ 기반암 심도와 같은 지층 구성 조건에 관계 없이 지표면부터 30m 깊이까지의 V_S 분포가 확보되어야 함에도 불구하고, V_{S30} 은 대상 부지 구성 지층의 평균적인 전단파 전달 속도를 반영

하는 정량적 기준이라는 측면에서 부지 효과와 관련된 매개 변수로서 현행 내진 설계 기준에 채택되어 보편적으로 적용되어 왔다.

3. 국내 부지에서의 지질 및 지반 동적 특성 평가

국내 고유의 지질 조건을 파악하고 지반 동적 특성으로서의 V_S 를 평가하기 위하여 다양한 부지들을 대상으로 지반 조사를 수행하였다. 지반 조사는 국내 12 곳 지역을 대상으로 총 72 개소 부지에서 수행되었다. 조사 기법은 지반 층서 파악을 위한 시추 조사와 V_S 분포 도출을 위한 현장 탄성과 시험(in-situ seismic tests)으로 구성된다. 본 연구에서 수행한 현장 탄성과 시험은 시추공 탄성과 시험(borehole seismic tests)과 지표 탄성과 시험(surface seismic tests)의 한 종류인 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 시험이다. 시추 조사가 병행되지 않고 SASW 시험만이 실시된 부지의 경우, 기설정된 지층과 V_S 의 관계를 토대로 지하 층서를 파악하였다.⁽⁵⁾ 부지별로 여건에 따라 차별적으로 적용된 현장 시추공 탄성과 시험은 크로스홀(crosshole, 시추공간), 다운홀(downhole, 하향식), 업홀(uphole, 상향식) 및 인홀(inhole, 시추공내) 탄성과 시험이고, 몇몇 부지들에서는 관입 형태의 탄성과 시험인 탄성과 피에조콘 관입 시험(SCPTu)이 수행되었다. 연구 대상 지역의 위치와 각 지역 내 시험 부지 개수 및 시험 내용은 그림 1과 같고, 각 부지별 지반 조사 기법과 파악된 부지 특성 및 지반 분류는 표 2에 제시하였다. 또한, 표 2에서는 지진시 부지의 공진 주기를 나타내는 부지 고유 주기(site period, T_G)도 제시하였으며, 부지 고유 주기는 각 부지의 기반암 상부 지층들의 두께와 V_S 를 토대로 식 (3)과 같이 결정할 수 있다.



〈그림 1〉 대상 지역의 위치 정보 및 지반 조사 내역

〈표 2〉 대상 부지의 지반 조사 정보 및 특성

Site Name*	Investigation Methods	H (m)	V_{s30} (m/s)	Site Class	T_G (sec)	Site Name**	Investigation Methods	H (m)	V_{s30} (m/s)	Site Class	T_G (sec)
GJ01	BI,CH,DH,SA	8.0	669	C	0.062	HS09	SA	28.0	327	D	0.300
GJ02	BI,CH,DH,SA	11.0	457	C	0.194	HS10	BI,CH,DH,SA	45.0	316	D	0.356
GJ03	BI,DH,SA	28.0	432	C	0.127	HS11	SA	24.0	337	D	0.258
GJ04	BI,DH,SA	19.0	381	C	0.193	HS12	SA	24.0	372	C	0.262
GJ05	BI,DH,SA	45.0	367	C	0.350	HS13	SA	24.0	362	C	0.240
GJ06	BI,DH,SA	31.0	382	C	0.242	HS14	SA	16.0	398	C	0.202
GJ07	BI,DH,SA	16.0	357	D	0.211	HS15	BI,CH,DH,SA	47.0	345	D	0.402
GJ08	SA	25.0	327	D	0.264	HS16	SA	28.0	332	D	0.267
GJ09	SA	14.0	561	C	0.128	SC01	BI,CH,DH,SA	8.7	854	B	0.064
GJ10	SA	50.0	412	C	0.421	SC02	SA	12.0	606	C	0.096
GJ11	SA	30.0	420	C	0.247	SC03	SA	12.0	625	C	0.096
GJ12	SA	14.0	616	C	0.107	SC04	SA	11.0	763	B	0.080
GJ13	SA	30.0	359	D	0.264	HM01	BI,CH,DH,SA	16.0	696	C	0.073
GJ14	BI,CH,DH,SA	38.0	385	C	0.299	HM02	SA	15.0	567	C	0.121
GJ15	BI,CH,DH	5.0	844	B	0.042	HM03	SA	23.0	532	C	0.161
GJ16	BI,DH,SA	32.0	397	C	0.229	HM04	SA	23.0	497	C	0.159
GJ17	BI,DH,SA	35.0	311	D	0.274	HM05	SA	23.0	594	C	0.134
GJ18	BI,DH	30.0	374	C	0.261	HD01	BI,CH,SA	12.0	472	C	0.205
GJ19	SA	2.0	1194	B	0.016	PC01	SA	74.0	443	C	0.541
GJ20	SA	8.0	1245	B	0.040	PC02	SA	55.0	504	C	0.377
GJ21	SA	16.0	535	C	0.144	PC03	SA	24.0	563	C	0.186
GJ22	SA	12.0	510	C	0.118	AS01	BI,DH,UH,IH	27.0	308	D	0.374
GJ23	SA	16.0	487	C	0.157	AS02	SA	31.0	296	D	0.411
GJ24	SA	20.0	497	C	0.158	AS03	SA	31.0	321	D	0.379
GJ25	SA	16.0	569	C	0.132	BSA01	BI,CH,DH	24.5	313	D	0.460
GJ26	SA	14.0	431	C	0.162	BSA02	BH,DH	30.0	300	D	0.400
GJ27	SA	40.0	411	C	0.325	ICA01	BI,CH,DH	37.0	220	D	0.605
GJ28	SA	36.0	439	C	0.244	ICA02	BI,DH	37.0	278	D	0.499
HS01	BI,DH	32.0	301	D	0.281	TY01	BI,CH	8.0	1225	B	0.056
HS02	SA	32.0	319	D	0.333	TY02	BI,CH	8.5	1310	B	0.048
HS03	SA	30.0	309	D	0.306	BSB01	SC	79.0	138	E	1.397
HS04	SA	26.0	359	D	0.240	BSB02	SC	55.0	136	E	1.328
HS05	BI,DH,SA	40.0	244	D	0.416	ICB01	BI,DH,SC	50.0	175	E	0.938
HS06	BI,CH,DH,SA	11.0	491	C	0.137	ICB02	BI,DH,SC	50.0	175	E	0.916
HS07	BI,DH,SA	30.0	343	D	0.286	ICB03	BI,DH,SC	50.0	181	D	0.901
HS08	SA	35.0	331	D	0.350	ICB04	BI,DH,SC	50.0	178	E	0.903

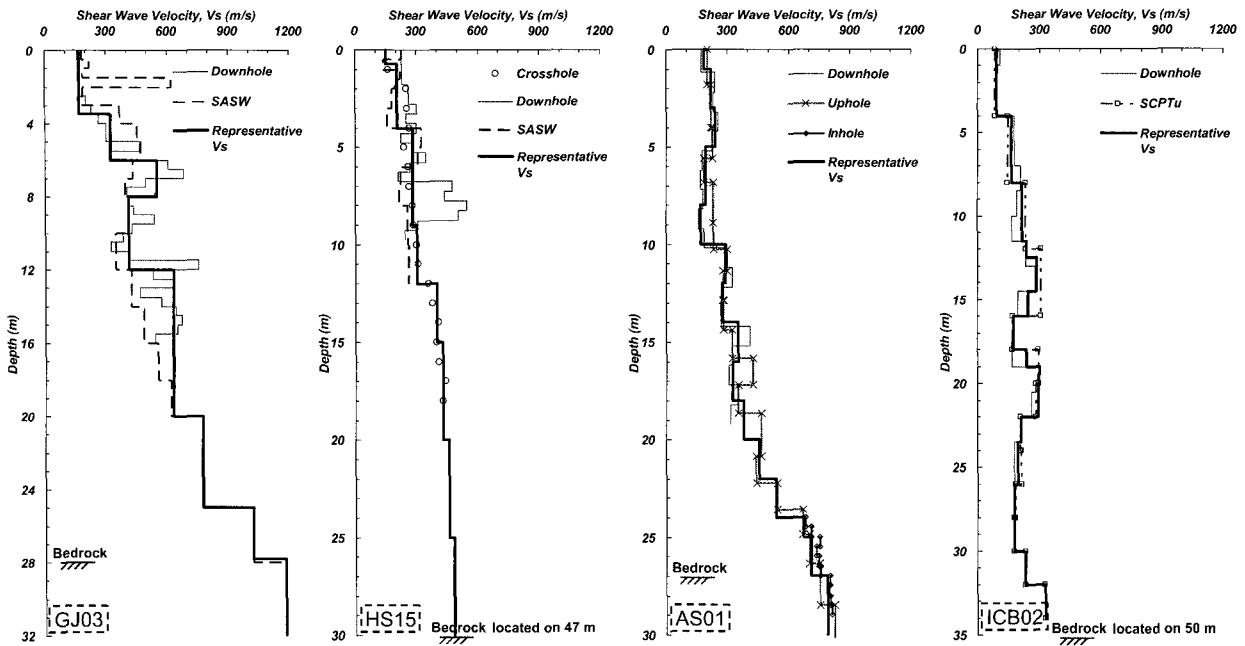
* 부지명의 첫 두문자는 다음과 같은 대상 지역명을 나타낸다. GJ: 경주(Gyeongju), HS: 홍성(Hongsung), SC: 사천(Sacheon), HM: 해미(Hemi), HD: 하동(Hadong), PC: 평창(Pyeongchang), AS: 아산(Asan), BS: 부산(Busan), IC: 인천(Incheon), TY: 통영(Tongyeong)

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{s_i}} \quad (3)$$

여기서, D_i 와 V_{s_i} 는 각각 기반암 상부에 분포하는 i 번째 지층의 두께($H = \sum D_i$)와 V_s

원지반의 V_s 분포를 획득하기 위한 여러 현장 탄성과 시험은 기법 별로 수행 및 분석 방법뿐만 아니라 신뢰도도 다소 차이를 보이게 된다. 일반적으로 비파괴 기법인 지표 탄성과 시험에 비해서 시추공 탄성과 시험의 신뢰도가 높고 그 중에서도 크로스홀 시험의 신뢰도가 가장 높은 것으로 알려져 있다.⁽¹⁹⁾ 또한, 현장 여건 및 시험 장비의 한계로 인해 단일 기법만을 적용할 경우 부지별 대상 심도까지의 전

체적인 V_s 획득이 어려울 수 있고, 시험 기법별 신뢰도 차이도 상존하므로, 경우에 따라서는 단일 부지에서 여러 현장 탄성과 시험을 병행하고 대표 V_s 를 결정하여 부지 동적 특성을 평가한다. 특히, 다운홀 탄성과 시험의 경우에는 부지 지하 조건이나 시험공 형성 상황이 양호하지 못할 경우 지표면에서 발진된 탄성과의 지반 내 반사 및 소산으로 소정 심도까지의 V_s 분포가 획득되지 못한 채 지표면 부근의 V_s 분포만이 획득될 수도 있다. 반면, SASW 시험은 시추공 탄성과 시험에 비해 깊은 심도에서 신뢰성이 상대적으로 다소 낮아질 수는 있지만, 발진원 및 현장 여건에 따라 깊은 심도까지의 V_s 분포를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 최소 30m까지의 V_s 분포를 도출하고자 상호 보완 목적으로 시추공 탄성과 시험 수행 부지에서 대부분 SASW 시험을 병행하였

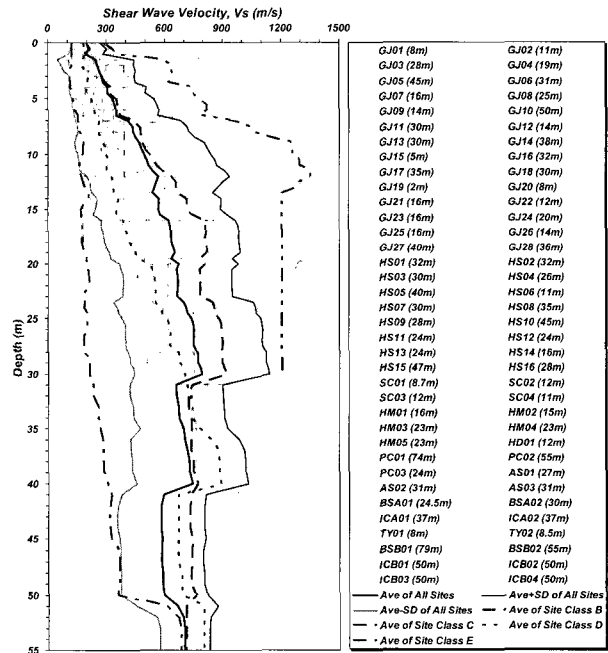


〈그림 2〉 대상 부지의 대표 전단파속도 분포 결정

으며, 기반암 심도나 시험공 상황과 같은 여러 현장 여건에 따라 시추공 탄성과 시험으로부터 30m까지의 V_s 분포가 획득되지 못한 경우 SASW 시험의 V_s 분포를 복합 활용하였다. 또한, 일부 부지들에서는 SASW 시험만이 실시되었고 (표 2 참조), 이로부터 30m까지의 V_s 분포를 도출하였다. 즉, 본 연구의 72 개소 부지들에서는 수행된 현장 탄성과 시험들의 기본적인 신뢰도에 따라 부지별 대표적 동적 특성으로서 30m까지의 대표 V_s 분포를 결정하였으며, 일부 전형적인 대상 부지들에서의 시험 종류별 V_s 분포와 대표 V_s 분포를 그림 2에 제시하였다.

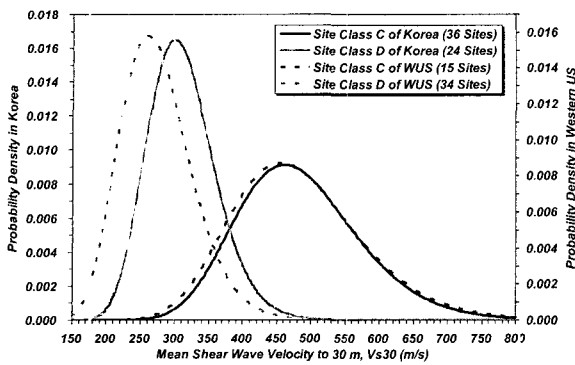
시험 대상 부지들의 전체적인 V_s 분포는 그림 3에서 확인할 수 있다. 그림 3의 범례에는 부지별 기반암 심도 괄호 안에 표시하였다. 대체로 국내 부지들에서는 기반암 심도가 깊은 경우 30~50m 정도의 분포를 보였고 퇴적층으로 구성된 일부 해안 부지들에서는 70m 이상의 분포를 보이기도 하였다(표 2 참조). 더불어, 국내 부지의 일반적인 V_s 분포 확인을 위하여 전체 부지의 평균 V_s 분포(범례의 Ave)를 표준 편차(범례의 SD)를 고려한 분포와 함께 도시하였으며, 지반 분류(B, C, D, E)별 평균 V_s 분포도 분류 조건별 상대적인 비교를 위하여 제시하였다. 표 2에서도 확인할 수 있는 바와 같이 본 연구의 시험 대상 부지들은 대체로 지반 분류 C 또는 D에 해당되었다.

앞서 언급된 바와 같이, 현행 국내 지반 분류 체계는 지역 고유의 지반 특성이 다를 수 있음에도 불구하고 미국 서부 지역의 체계를 준용하고 있는 실정이다. 기존 연구 결과들(5,12,20)에 의하면, 국내의 경우 미국 서부 지역 지역에 비해

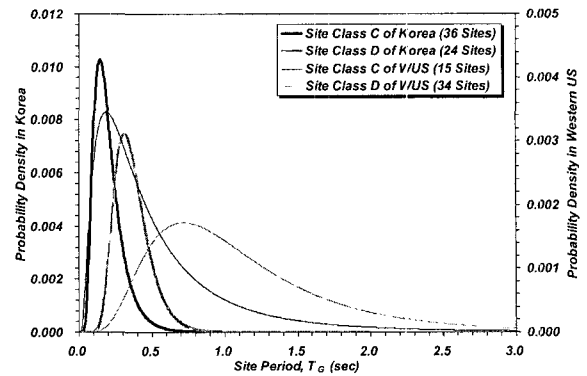


〈그림 3〉 국내 시험 대상 부지들에서의 깊이에 따른 전단파속도 분포

기반암 심도는 얕고 토사의 강성이 상대적으로 크므로 서로 상이한 지진 응답 특성을 보이게 된다. 그림 4에는 기존 연구들의 미국 서부 지역 비교 부지로 활용된 ROSRINE(Resolution Of Site Response Issues from the Northridge Earthquake) 부지들과 본 연구 대상 부지들의 지반 특성 차이를 파악하고자 국내의 주요 지반 분류 범주인 C와 D에 대한 V_{s30} 의 분포를 비교하였다. 지반 분류 B와 E는 국내 주요 지반 분류 범주도 아닐 뿐만 아니라 미국 서부 지역(ROSRINE 부지)의 자료 수(지반 분류 B 및 E에서 각각 3 개소 및 1 개



〈그림 4〉 우리나라와 미국 서부 지역에 대한 30m까지의 평균 전단파 속도 분포 비교



〈그림 5〉 국내외 미국 서부 지역에 대한 부지 고유 주기(T_0) 분포 비교

소)도 상대적으로 적기 때문에 본 논문에서 그들의 비교 결과는 논의하지 않았다. 그림 4에서 지반 특성인 V_{s30} 은 0보다 큰 값으로만 존재할 수 있으므로 확률 밀도 분포는 대수 정규 분포(lognormal distribution)로 가정하였고⁽²¹⁾, 확률 분포 결정에 이용된 자료 수는 범례에서 확인할 수 있다.

지반 분류 C의 경우 국내와 미국 서부 지역의 분포 범위가 매우 유사하게 나타난 반면, 지반 분류 D의 경우 다소 상이한 분포 범위를 보인다. 지반 분류 C에 해당되는 부지는 지반 분류 D에 비해 토사 강성은 크고 기반암 심도는 대개 얇은 부지 조건이므로 국내와 미국 서부 지역간의 지질 및 지반 동적 특성의 차이가 적게 발생할 수 있다. 그러나 지반 분류 D에서는 국내와 미국 서부 지역의 특성 차이가 지반 분류 C에 비해 상대적으로 크게 나타날 수 있다. 그에 따라 그림 4에서 확인할 수 있는 바와 같이, 지반 분류 D 조건에서는 국내 부지의 대부분이 C와 D 지반 분류 경계 ($V_{s30} = 360\text{m/s}$) 부근에 밀집 분포되어 있지만 미국 서부 지역 부지는 D 지반 분류 범위 전체($180\text{m/s} < V_{s30} \leq 360\text{m/s}$)에 걸쳐 분포되어 있다. 이러한 지반 분류 조건 별 분포 범위의 지역적 차이 경향은 V_s 로 대표되는 강성뿐만 아니라 기반암 심도도 고려하여 산정하는 T_0 의 분포 비교를 통해서도 그림 5에 제시한 바와 같이 확인할 수 있다. 특히, T_0 의 경우 국내와 미국 서부 지역간의 분포 범위 차이가 지반 분류 D는 물론 지반 분류 C에서도 다소 보여지고 있다. 즉, 동일한 지반 분류 범주에서도 기반암 심도가 깊은 미국 서부 지역의 T_0 는 단주기부터 중장주기에 걸쳐 분포하는 반면, 기반암 심도가 얇은 국내 지역의 T_0 는 주로 0.5 초 미만의 단주기에 분포한다. 따라서 국내와 미국 서부 지역 지반 특성 중 가장 명확한 차이는 기반암 심도이며, 이러한 지역적 특성 차이와 경험적 기준 변수로서의 V_{s30} 의 도입 상황을 고려하여, 기반암 심도가 상대적으로 얇게 분포하는 국내 지역에서의 30m 미만의 얇은 심도까지만 분포하는 V_s

자료를 이용하여 V_{s30} 을 산정하고 지반을 분류하기 위한 활용 방안들을 다각적으로 고찰해 보았다.

4. 얇은 심도 전단파속도 분포 자료를 활용한 V_{s30} 결정 및 지반 분류

현재 국내 부지에서 설계 지진 지반 운동을 결정하기 위해서는 기준으로 정량화된 방법에 따라 V_{s30} 을 산정하고 지반 분류를 수행해야 한다. 국내 지역과 이의 근간인 미국 서부 지역의 지역적 지반 특성의 차이와 그에 따른 지진 응답 특성의 차이를 반영하기 위한 다각적 연구들^(5,13,20)에서 현행 국내 내진 설계 기준의 지반 분류 체계와 지반 증폭 계수를 개선하기 위한 노력들이 진행되어왔다 할지라도, 아직까지는 설계 기준에 채택되지 않은 상황이므로 설계 지반 운동 결정을 위해 V_{s30} 의 산정은 선행되어야 한다. 본 연구에서는 현행 기준 심도인 30m까지 획득되지 못하고 다양한 이유로 인해 그 보다 얇은 심도까지만 V_s 가 획득된 자료를 토대로 V_{s30} 을 결정하기 위한 두 가지 방안을 국내의 현장 탄성과 시험을 통해 획득한 V_s 분포 자료들을 분석하여 제시하였다. 첫 번째 방안은 30m 미만 얇은 심도까지의 평균 V_s 와 V_{s30} 의 상관관계를 활용하는 기법이며, 두 번째 방안은 30m 미만의 V_s 획득 종료 심도부터 30m까지의 V_s 분포에 대한 형상 곡선(shape curve; 형상 함수 (shape function))을 활용하는 기법이다. 이러한 활용 기법들은 30m까지 V_s 가 획득되지 못한 경우에도 내진 설계 및 내진 성능 평가 목적의 지반 분류를 가능케 하므로, 기존 지반 동적 특성 조사 자료의 활용성을 배가시킬 수 있다.

4.1 30m 미만 심도까지의 평균 전단파속도 활용

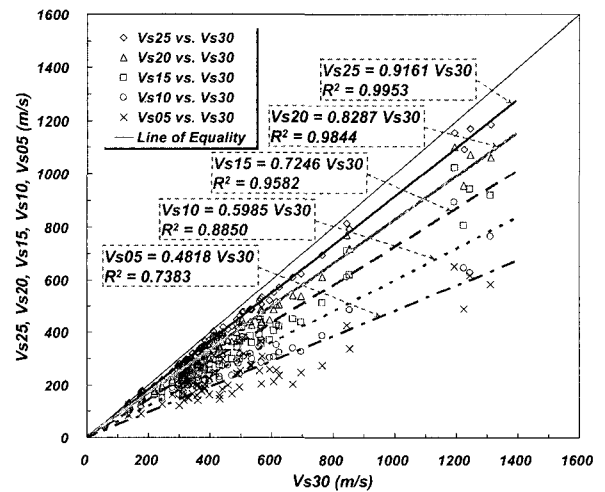
현행 국내 내진 설계의 지반 분류 기준인 V_{s30} 은 기반암 심도가 깊은 미국 서부 지역 부지들의 지표면 부근 동적 특

성으로서의 경험적 지표를 의미하므로, 국내와 같이 기반암 심도가 얕은 지역에서는 30m보다 얕은 심도까지의 평균 V_s 도 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 이러한 활용 방안 및 필요성은 최근 국내 내륙에서의 부지 응답 특성의 정량적 평가 관련 연구들^(5,13)에서 V_{s20} , V_{s15} 그리고 V_{s10} 의 규격화된 추가 기준 변수들의 형태로 소개된 바 있다. 그렇다 할지라도 현행 내진 설계 기준에서는 V_{s30} 의 산정을 통해 지반 분류가 가능하므로, 본 연구에서는 30m 심도 이상까지의 V_s 분포 획득이 이루어진 국내의 다양한 조건 부지들에서의 지반 특성을 토대로 30m 미만 임의의 심도(a depth shallower than 30m, Ds)까지의 평균 $V_s(V_sDs)$ 를 산정하고 V_sDs 와 V_{s30} 의 상관관계를 도출하고자 하였다.

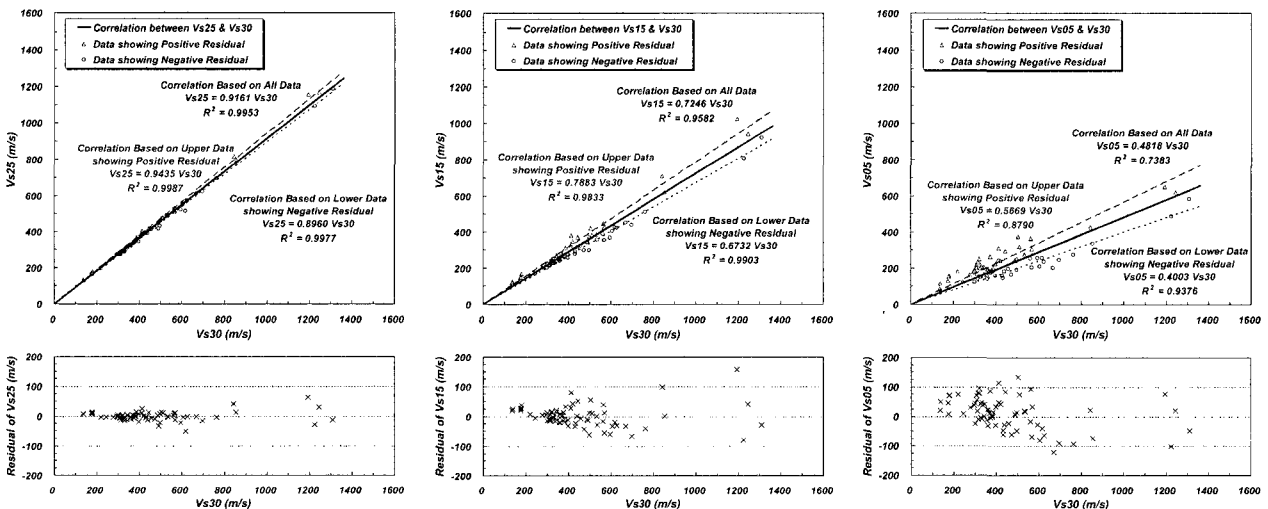
국내 지역에 대한 V_{s30} 과 V_sDs 의 상관관계를 도출하기 위하여 30m 이상 심도까지 확보된 조사 부지 72 개소의 깊이 에 따른 V_s 분포를 토대로 30m보다 얕은 심도인 25m, 20m, 15m, 10m 그리고 5m까지의 평균 V_s 들(V_{s25} , V_{s20} , V_{s15} , V_{s10} 그리고 V_{s05})을 산정하고, V_{s30} 과 각각 선형 회귀 분석을 실시하였다. 5 종류의 V_sDs 들에 대한 회귀 분석 과정 중 잔차(residual) 분석도 수행하였다. 그림 6은 5 종류의 V_sDs 들 중 3 종류의 $V_sDs(V_{s25}$, V_{s15} , $V_{s05})$ 와 V_{s30} 의 회귀 분석 결과를 대표적으로 도시한 것이며, 활용 심도가 얕아질수록 잔차가 커지고 결정 계수(coefficient of determination, R^2)가 작아지므로 상관도가 떨어지고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 각 분석 과정에서는 전체 대상 자료에 대한 상관관계뿐만 아니라 양의 잔차와 음의 잔차를 보이는 자료들에 대한 추가 회귀 분석을 실시하여 각각 상한과 하한의 상관관계를 확인하였으며, 상한과 하한 선형 상관관계간 이격 폭의 증가 경향($V_{s25} < V_{s15} < V_{s10}$)을 통해 활용 심도가 다른 V_sDs

간의 상관도 차이를 가지적으로 파악할 수 있다.

비록 V_sDs 의 활용 심도가 얕아질수록 상관성이 떨어지는 경향은 있으나, 국내 72 개소 부지의 자료에 기반한 5 종류의 분석 과정에서 전체적으로 상당히 높은 결정계수(0.9953~0.7383)를 보이는 양호한 상관성을 확인하였다. 그림 7에는 5 종류의 전체 V_sDs 들과 V_{s30} 의 상관관계를 종합 도시하였으며, 활용 심도가 얕아질수록 V_{s30} 을 변수로 하는 V_sDs 의 경험적 관계식의 기울기가 작아지는 경향을 나타낸다. 본 연구에서는 이러한 기울기 감소 경향의 정량화를 통해 30m보다 얕은 임의의 심도까지의 평균 V_s 를 이용하여 현행 지반 분류 기준인 V_{s30} 을 산정할 수 있는 일반적인 형태의 경험적 상관관계식을 도출하고자 하였다. 이를 위하여 기 도출된 V_{s30} 과 V_sDs 들간의 5 종류 관계식들의 기울기(그림 7 내에 제시된 관계식)를 평균 V_s 계수(coefficient for mean V_s , Cs)로 정의하고 Ds들과의 비선형 회귀 분석을 실시하였



〈그림 7〉 V_{s30} 과 V_sDs 들간의 상관관계



(a) V_{s30} 과 V_{s25}

(b) V_{s30} 과 V_{s15}

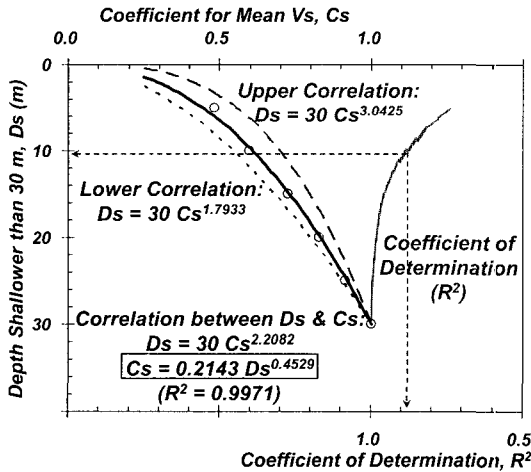
(c) V_{s30} 과 V_{s05}

〈그림 6〉 V_{s30} 과 V_{s25} , V_{s15} 및 V_{s05} 의 상관관계와 잔차

다. 그림 8은 D_s 와 C_s 의 상관관계 곡선으로서 V_{s30} 과 $V_s D_s$ 들의 상한 및 하한 상관관계(그림 6 참조)를 토대로 D_s 와 C_s 에 대한 상한 및 하한으로 재분석된 관계 곡선(각각 굵은 파선 및 굵은 점선)도 확인할 수 있다. 또한, 상관도를 의미하는 결정계수(R^2)와 D_s 의 관계도 종합적 판단을 위하여 도시하였다. 이러한 상관 분석 결과로부터 식 (4)와 같은 V_{s30} 과 $V_s D_s$ 의 일반적인 상관관계식을 도출하였으며, 30m까지의 값이 확보되지 못한 V_s 분포 자료를 이용한 V_{s30} 의 산정 방안으로 제시하였다.

$$V_{s30} = V_s D_s / C_s = V_s D_s / (0.2143 D_s^{0.4529}) \quad (4)$$

이와 같은 얇은 심도까지의 V_s 분포 자료는 미국 서부 지역에 비해 상대적으로 기반암 심도가 얇은 국내 부지 조건에 더욱 효율적인 방안으로 적용될 수 있을 것으로 보인다. 그렇다 할지라도 보다 다양한 부지의 특성 자료 축적을 통한 상관관계 개선이 필요할 것으로 보인다. 현재까지의 자료에 근거한 그림 8의 깊이(D_s)에 따른 결정계수(R^2)의 정량적 변화를 살펴볼 때, 활용 심도(D_s)가 얇아질수록 비선형적으로 결정계수가 감소하고 있다. 특히, 10m보다 얇을 경우 상관도는 현저히 낮아지므로 현장에서 최소 10m 이상의 깊이에 따른 V_s 분포를 획득하여 내진 설계 지반 운동 결



〈그림 8〉 D_s 와 C_s 의 상관관계 및 결정계수 분포

〈표 3〉 심도 30m와 기반암 심도에 따른 전단파속도 분포 자료의 구분 및 지반 운동 결정

V_s 심도 분포 자료 구분	V_s 분포 심도(D_c)	심도 30m 및 기반암 심도(H) 비교	지반 운동 결정 방법	
			V_{s30} 이용 지반 분류	부지 응답 해석*
Case 1	$D_c < H$	$H < 30$ m	-	-
Case 2	$H \leq D_c < 30$ m	$H < 30$ m	-	적용 가능
Case 3	30 m $\leq D_c$	$H < 30$ m	적용 가능	적용 가능
Case 4	$D_c < 30$ m	30 m $\leq H$	-	-
Case 5	30 m $\leq D_c < H$	30 m $\leq H$	적용 가능	-
Case 6	$H \leq D_c$	30 m $\leq H$	적용 가능	적용 가능

* 부지 응답 해석이 가능한 경우 T_G 를 이용한 지반 분류가 가능하지만, $H = D_c$ 인 경우 T_G 를 이용한 지반 분류만 가능

정을 위한 지반 분류를 수행함이 바람직할 것으로 보인다. 따라서 부지 특성 자료의 여건에 따른 차선의 분류 기준으로서 10m 이상 30m 이하 심도까지의 평균 V_s 가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그렇다 할지라도, 현행 내진 설계 기준에 근거한 지반 분류를 보다 정확하게 수행하기 위해서는 30m 이상 심도까지의 V_s 분포 확보가 우선적으로 고려되어야 하며, 여러 불리한 여건에 따라 이의 확보가 불가능한 경우에 차선의 방안으로 10m 이상 30m 이하 심도까지의 V_s 분포를 전문가적 판단에 근거하여 제한적으로 이용해야 할 것이다.

4.2 전단파속도의 깊이 분포 형상 곡선 함수 활용

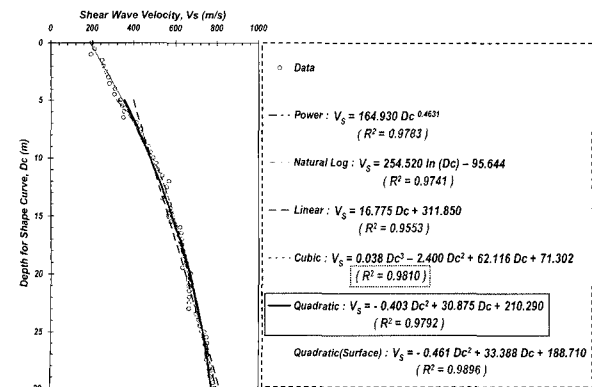
현장에서의 여러 탄성과 시험으로부터 획득한 깊이에 따른 V_s 분포는 지반 지진공학적 견지의 다양한 접근 기법을 통해 지표면 부근의 지진 지반 운동의 결정에 이용된다. 그 대표적 방법은 현행 내진 설계 기준에 따라 V_{s30} 을 산정하여 지반 분류를 적용하는 방법과 부지 응답 해석(site response analysis)을 수행하는 방법이다. 그 외에도 부지 고유 주기(T_G)를 이용하여 지반을 분류하는 방법이 최근 국내외의 연구들^(15,22,23)에서 제시된 바 있으나, 현재까지는 공식적으로 내진 설계 기준에 반영되지 않고 있다. 이와 같은 방법들을 적용하기 위해서는 각 방법 별로 요구되는 심도나 지층까지의 V_s 분포 자료가 필요하다. 이미 반복해서 강조 기술된 바와 같이, V_{s30} 을 이용한 지반 분류를 위해서는 최소한 30m까지의 V_s 분포 자료가 요구되며, 부지 응답 해석의 경우 기반암을 포함한 V_s 분포 자료가 필요하다. 또한, T_G 에 근거한 지반 분류를 수행하기 위해서는 기반암의 V_s 를 획득할 필요는 없지만 기반암 심도까지의 토사에 대한 V_s 분포 자료가 필요하다. 따라서 열거된 방법들을 모두 적용할 수 있는 V_s 분포 자료는 30m 이상의 심도까지 분포해야 할 뿐만 아니라 30m 이상의 깊이에 위치할 수도 있는 기반암까지의 전체 V_s 도 포함해야 한다. 그러나 이와 같은 V_s 분포 획득은 현실적으로 현장 시험 여건, 경제적 이유 등으로 인해 어려울 수 있으며, 표 3은 실제 현장에서 결정될 수 있는 V_s 심

도(Dc; V_S 의 획득 종료 심도) 분포 자료를 심도 30m와 기 반암 심도(H)를 기준으로 구분하여 제시한 것이다. V_S 심도 분포 자료의 구분(Case 1~Case 6) 별로 표 3에서 V_{S30} 및 부지 응답 해석을 이용하는 방법들을 적용한 지진 지반 운동의 결정 가능 여부를 확인할 수 있다.

본 연구에서는 심도 30m까지의 V_S 가 확보되지 못함에 따라 V_{S30} 을 이용한 지반 분류 방법이 적용 불가능한 표 3의 Case 1, Case 2와 Case 4를 대상으로 V_S 의 획득 종료 심도(Dc)부터 30m 깊이까지의 V_S 를 예측할 수 있는 기법을 제시하고자 하였다. 예측 기법으로 선정한 방법은 Dc부터 지하 30m까지 V_S 를 외삽(extrapolation)하는 방법이며, 이를 위하여 본 연구의 72 개소의 V_S 분포 자료들을 토대로 심도 증가에 따른 함수 형태의 형상 곡선을 도출하였다. 국내 지역에 대한 대표적 형상 함수를 도출할 목적으로 먼저 전체 V_S 자료(72 곳)에 대한 30m까지의 평균 V_S 분포를 지표면부터 0.5m 간격의 점(point) 자료로 작성한 후, 깊이 5m부터 30m까지의 자료에 대해 다양한 함수 형태를 가정하여 그림 9와 같이 V_S 와 심도에 대한 회귀 분석을 실시하였다. 회귀 분석 결과를 토대로 본 연구에서는 비록 삼차 함수(cubic function)의 결정 계수(R^2)가 다소 높게 나타났을 지라도 적용 효율성을 고려하여 식 (5)와 같은 이차 함수(quadratic function)를 국내 지역의 대표 형상 곡선으로 선정하였다. 또한, 그림 9에는 이차 함수로 가정된 지표면부터 30m까지의 형상 곡선도 비교 도시하였다.

$$V_S = -0.403Dc^2 + 30.875Dc + 210.290 \quad (5)$$

국내 72 개소 부지에 대한 30m까지 V_S 의 평균 분포를 토대로 도출된 형상 곡선 함수인 식 (5)는 실제 30m 미만의 얕은 심도까지만 획득된 V_S 분포 자료의 외삽에 적용되기 위해서는 각 부지 자료의 종료 심도 및 그의 V_S 값을 반영할



〈그림 9〉 국내 5m부터 30m까지 깊이별 전단파속도의 평균 분포에 대한 형상 곡선 함수

수 있는 일반화가 필요하다. 식 (6)은 식 (5)를 토대로 일반화한 형상 곡선 함수이며, 적용할 얕은 심도까지의 V_S 분포 자료에 따라 가변적인 항인 $V_S(Dc)$ 의 함수 관계는 식 (7)과 같다.

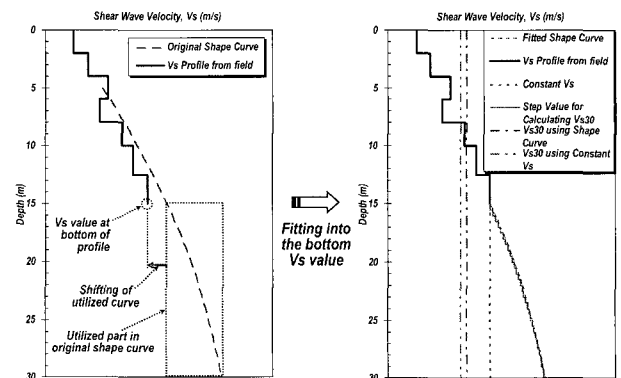
$$V_S = -0.403Dc^2 + 30.875Dc - V_S(Dc) \quad (6)$$

$$V_S(Dc) = -0.403Dc_{(ET)}^2 + 30.875Dc_{(ET)} - V_{S(ET)} \quad (7)$$

여기서, $Dc_{(ET)}$ 와 $V_{S(ET)}$ 는 각각 적용 자료의 V_S 획득 종료 심도와 그 심도의 V_S 값

도출된 형상 곡선을 이용하여 30m 미만 심도까지만 V_S 가 획득된 자료에 대한 30m까지의 외삽 과정은 그림 10의 일반적인(V_S 의 정량 수치 생략) 예시에서 확인할 수 있다. 식 (5)와 같이 도출된 대표 형상 곡선은 그림 10(좌측)에 나타난 바와 같이 실제 V_S 분포 자료와는 종료 심도가 일치되지 않는 상황이 일반적이다. 대표 형상 곡선의 모양은 유지한 채 심도를 일치시키는 과정은 식 (6) 및 식 (7)의 적용을 통해 이루어진다. 그림 10(우측)의 최종적인 30m까지의 V_S 분포는 실제 현장 부지의 V_S 분포 자료와 현장 부지 V_S 획득 종료 심도부터 30m까지의 대표 형상 곡선 일부 구간의 조합으로 이루어지며, V_{S30} 의 산정은 대표 형상 곡선 적용 구간에 대한 단계화(그림 10에서는 0.5m 간격의 단계 설정)를 통해 가능하다. 형상 곡선을 이용하여 결정된 지표면부터 30m까지의 V_S 분포와 현장 부지의 종료 심도에 해당되는 V_S 를 동일하게 30m까지 연장한 V_S 분포를 그림 10(우측)에서 비교하였으며, 그에 따른 V_{S30} 에 있어서 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 형상 곡선을 이용한 외삽 방법이 크게 결정되었다.

본 연구에서 도출하여 적용한 형상 함수는 국내 72 곳 부지의 깊이에 따른 V_S 분포를 평균적으로 반영한 것으로서



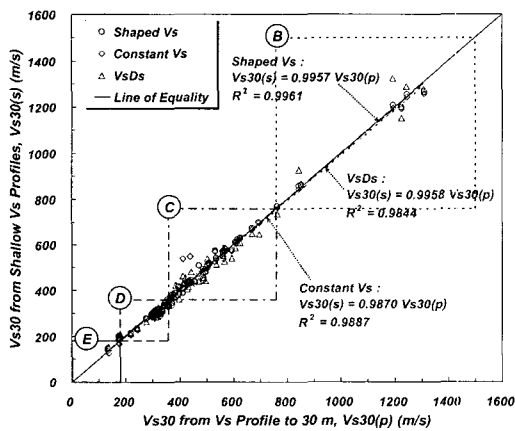
〈그림 10〉 형상 함수를 이용한 30m 심도까지의 전단파속도 분포 작성 예시도

일반적인 얇은 심도 V_s 분포 자료의 30m까지의 외삽을 통한 V_{s30} 산정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. 다만, 형상 함수 도출 근거 부지의 수가 아직은 72 개소에 불과하여 부족한 실정이고 향후 지속적 보완 사항으로 고려될 수 있는 부지 조건이나 토사 종류별 구분도 반영되지 못한 상황이므로 일반적 적용 시에는 지반 및 지진공학적 전문견지의 종합적 판단이 필요할 것이다. 뿐만 아니라 30m 미만 심도 내에 불균질한 지층이 존재함에 따라 얇은 심도까지 조사된 V_s 분포 내에 급격한 V_s 값의 변화가 존재하는 경우, 종로 심도 값이 상부 값에 비해 급격히 작거나 커진 경우, 조사되지 못한 하부 심도 내에 값이 매우 크거나 작은 부분이 존재하는 경우 등의 모호성 및 불확실성이 상존할 수 있다. 이러한 경우의 상황에서는 단순히 형상 곡선을 통한 V_s 분포의 외삽 적용보다는 전문가적 종합 판단에 따라 V_{s30} 산정을 위한 V_s 분포를 결정하거나 V_{s30} 에 근거한 지반 분류 기법 이외의 다른 방법을 고려해야 할 것이다. 비록, 아직은 제한적이고 그 적용 한계도 존재하지만 본 연구에서는 이러한 형상 곡선 함수를 이용한 기법을 앞 절에서 제시

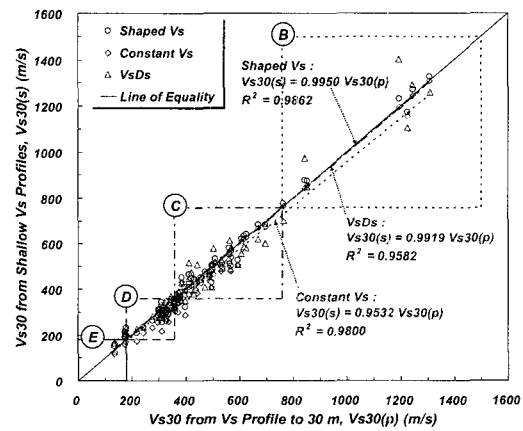
한 V_s Ds를 활용하는 기법과 더불어 30m 미만 얇은 심도까지만 획득된 V_s 분포 자료에 대한 V_{s30} 산정 및 지반 분류 방안으로 제시하였다.

4.3 얇은 심도의 전단파 속도 주상도를 활용한 지반 분류

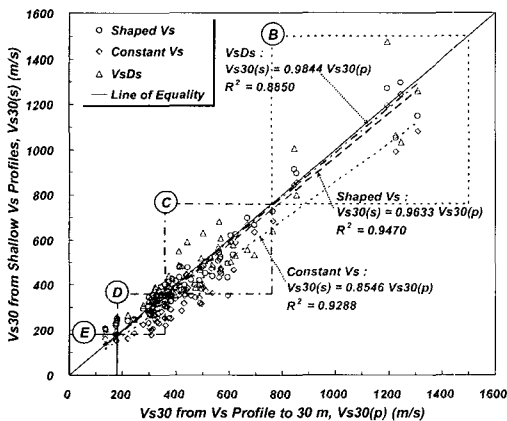
여러 현장 상황 및 시험 조건에 따라 V_{s30} 의 결정을 위한 30m까지의 V_s 를 획득하지 못하고 그 보다 얇은 심도까지만 제한적으로 획득된 V_s 분포 자료는 그 활용성을 상실하거나 지반공학 전문가들에 의해 극히 제한적 활용만이 이루어져 왔다. 이러한 얇은 심도 V_s 분포 자료를 이용한 V_{s30} 결정 및 그에 따른 지반 분류를 목적으로 본 연구에서는 V_s Ds와 형상 곡선을 적용하는 두 기법을 제시하였다. 제시된 기법들의 적용성을 정량적으로 확인해 보고자, 본 연구의 대상 72 개소 부지들의 깊이에 따른 V_s 분포를 이용하여 30m까지의 V_s 분포를 토대로 산정한 $V_{s30}(V_{s30}(p))$ 로 구분 표시)과 대표적인 얇은 심도로 가정된 20m, 15m, 10m 그리고 5m의 V_s 분포들을 토대로 두 제안 기법을 적용하여 산정한 $V_{s30}(V_{s30}(s))$ 로 구분 표시)을 그림 11에 도시한 바와 같이



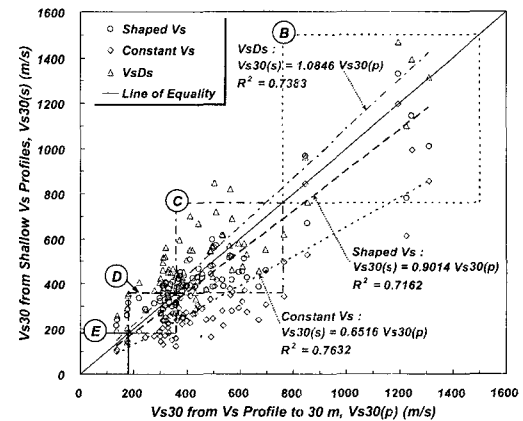
(a) 20m 심도까지의 V_s 분포 활용



(b) 15m 심도까지의 V_s 분포 활용



(c) 10m 심도까지의 V_s 분포 활용



(d) 5m 심도까지의 V_s 분포 활용

(그림 11) 얇은 심도의 V_s 분포를 활용한 V_{s30} 결정 방법들의 비교

비교하였다. 그림 11에는 비교 목적으로 형상 곡선을 적용하지 않고 V_s 획득 종료 값을 30m까지 동일하게 가정하는 단순 기법으로 산정한 V_{s30} (범례에서 Constant V_s ; Shaped V_s 는 형상 곡선 적용 기법)도 함께 제시하였으며, 제시한 각 얕은 심도 별 그래프 내에는 지반 분류 B, C, D 및 E에 대한 V_{s30} 의 범위 상자 및 적용 기법 별 추세선과 관계식도 표시하였다.

비교 결과를 전체적으로 살펴볼 때, 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 $V_{s30}(s)$ 결정을 위한 V_s 분포의 활용 심도가 얕아질수록 $V_{s30}(p)$ 와 $V_{s30}(s)$ 의 차이가 커지고 있음(그림 11(a)로부터 그림 11(d)의 순서)을 추세선과 등가선(line of equality)의 차이를 통해 확인할 수 있다. 심도 20m까지의 V_s 분포(그림 11(a))를 토대로 산정한 $V_{s30}(s)$ 는 비록 Constant V_s 적용의 단순 기법과 V_sDs 적용 기법의 일부 결과에서 다소 차이를 보이기는 하였지만 대체로 적용 기법에 관계없이 $V_{s30}(p)$ 와 유사하게 나타난다. 비록 그래프로 제시하지는 않았지만 심도 25m에 대한 비교 결과의 경우 적용 기법에 관계 없이 거의 모든 자료가 등가선을 따라 분포하는 일관된 경향을 나타낸다. 즉, 20m 이상 심도까지의 V_s 분포가 확보된 경우 본 연구에서 제안한 V_sDs 및 형상 곡선을 적용하는 두 기법뿐만 아니라 단순 적용 기법도 비교적 합리적으로 이용될 수 있을 것으로 보인다. 그러나 15m 심도까지의 V_s 분포(그림 11(b))를 이용하는 경우 종료 심도 하부를 증가 형상이 아닌 일정한 V_s 로 가정하는 단순 적용 기법의 $V_{s30}(s)$ 가 $V_{s30}(p)$ 에 비해 대체로 작게 산정되고 있다. 이와 같은 경향은 그림 11(c)와 그림 11(d)에서 보여지고 있는 것처럼 심도가 얕아질수록 더욱 두드러지며, 그로 인해 본래의 지반 분류가 증폭이 커져 설계 지반 운동이 보다 크게 결정되는 한 단계 하위의 지반 분류로 구분되는 분류 오류(예를 들면, 지반 분류 C가 D로 분류됨)를 보이는 자료가 많이 나타나고 있다. 반면, 심도 5m의 V_s 분포를 이용하는 경우(그림 11(d))를 제외하고는 본 연구에서 얕은 심도 V_s 분포 자료의 활용 방안으로 제안한 V_sDs 와 형상 곡선을 적용하는 기법들은 10m 심도의 V_s 분포까지 $V_{s30}(s)$ 가 $V_{s30}(p)$ 와 유사한 경향을 보인다. 그렇다 할지라도 그림 11(c)에서 확연히 나타나고 있는 바와 같이 국내 주요 지반 분류인 C와 D의 경계 부근에서는 상당 수의 결과에서 분류 오류를 보이고 있으며, 주로 지반 분류 D가 C로 그릇되게 구분되고 있다. 국내 내륙의 많은 부지들의 V_{s30} 이 지반 분류 C와 D의 경계 값($V_{s30} = 360\text{m/s}$) 부근에 해당되는 상황을 고려해 볼 때^(5,13), 이와 같은 경계 부근 값의 V_{s30} 을 보일 것으로 예상되는 부지에 대한 철저한 현장 조사가 선

행되어야 하고 더불어 근본적으로 이러한 부지들에 대한 지반 분류 체계 합리화 방안들⁽¹³⁾ 또한 실제 설계 지반 운동 결정 과정에서 고려해 봐야 할 것으로 판단된다.

V_{s30} 의 산정 기법별 비교 결과를 종합해 볼 때, 본 연구에서 제안한 V_sDs 및 형상 곡선을 적용하는 기법을 토대로 30m 미만 10m 이상 심도까지의 V_s 분포 자료를 이용한 V_{s30} 산정 및 그에 따른 지반 분류가 비교적 합리적으로 이루어 질 수 있을 것으로 보인다. 그렇다 할지라도 현행 내진 설계 기준의 지반 분류를 통한 설계 지반 운동의 결정을 위해서는 현장 지반 조사에서 30m까지의 V_s 도출을 우선적으로 달성해야 하며, 부지 응답 해석을 통한 지반 운동 평가 목적의 경우 30m 심도에 관계없이 기반암까지의 V_s 확보되어야 한다. 더불어, 본 연구의 제안 기법은 국내 72 개소의 제한적 부지 조건에 대한 V_s 분포 자료들을 이용하여 도출된 것이므로 보다 다양한 부지 조건의 자료 확보를 통한 지속적 보완이 이루어 져야 할 것이다.

5. 결론 및 제언

현행 내진 설계 기준에 근거하여 설계 지진 지반 운동을 결정하기 위해서는 심도 30m까지의 평균 전단파속도(V_{s30})를 산정하고 그에 따른 지반 분류를 수행해야 하며, 이를 위해서는 현장 탄성과 시험을 통해 심도 30m까지의 전단파속도(V_s) 분포가 확보되어야 한다. 그러나 실제 현장에서는 여러 불리한 상황 여건이 상존하고 경우에 따라서는 적용 시험 기법의 제한성이 대두됨에 따라 30m 이상 심도까지의 V_s 분포 도출이 불가능하여 30m 미만의 얕은 심도까지만 V_s 분포가 결정되는 상황이 빈번하다.

본 연구에서는 이와 같은 얕은 심도까지의 V_s 분포 자료를 토대로 V_{s30} 을 산정하고 지반을 분류할 수 있는 기법을 개발하여 제안하고자, 국내 72 개소 부지들에서 다양한 현장 탄성과 시험들을 통해 30m 이상 깊이까지의 V_s 분포를 획득하고 그 자료들을 여러 얕은 심도의 자료들로 구분하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 심도 25m, 20m, 15m, 10m 및 5m의 얕은 심도까지의 평균 V_s 들과 V_{s30} 과의 상관관계를 분석하였으며, 이로부터 일반화된 얕은 심도(D_s)까지의 평균 $V_s(V_sDs)$ 와 V_{s30} 과의 상관관계식을 $V_{s30}=V_sDs/(0.2143D_s^{0.4529})$ 와 같이 도출하였다.
- (2) 국내 대상 부지들의 평균 V_s 분포 자료를 토대로 5m부터

30m까지의 심도(Dc) 증가에 따른 대표 형상 곡선을 $V_s = -0.403Dc^2 + 30.875Dc + 210.290$ 의 함수 형태로 도출하여 얇은 심도 V_s 분포 자료의 외삽 기법으로 제시하였다.

- (3) 국내 부지 특성의 V_s 분포 자료를 이용하여 도출된 두 기법들을 최종 심도의 V_s 를 30m 깊이까지 일정하게 연장하는 단순 기법과 비교해 본 결과, V_s 확보 심도가 얇아질수록 단순 기법은 실제 V_s 30에 비해 그 값이 작아지는 편향 정도가 두드러지는 반면, 본 연구에서 도출된 두 기법들은 V_s 가 10m 이상 심도까지 확보된 경우 편향 정도는 비교적 적게 나타났다.
- (4) 이와 같은 비교 결과를 근거로 본 연구에서는 V_s Ds와 형상 곡선을 활용하는 두 기법들을 10m 이상 30m 미만의 얇은 심도 범위의 V_s 분포 자료로부터 V_s 30을 결정하고 지반 분류를 수행할 수 있는 방안으로 제안하였다. 그렇다 할지라도 보다 다양한 부지 조건에 대한 V_s 분포 자료의 확보를 통한 기법들의 지속적 보완과 지반 특성의 구분을 통한 토사 조건별 상세 기법 개발도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본 사업인 ‘실시간 지진 분석 및 지진재해 정량적 예측 기술 개발’ 과제의 지원과 서울대학교 공학연구소의 연구 협조로 수행되었으며, 이에 매우 감사드립니다.

참고 문헌

- 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.
- ICBO, 1997 *Uniform Building Code*, Volume 2 - Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials, 1997.
- 건설교통부, 내진설계기준연구 (II), 1997, pp. 708
- BSSC, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Part 1-Provisions, 2000 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington D. C., 2000.
- Sun, C.G., Kim, D.S. and Chung, C.K., "Geologic Site Conditions and Site Coefficients for Estimating Earthquake Ground Motions in the Inland Areas of Korea," *Engineering Geology*, Vol. 81, 2005, pp. 446-469.
- ICC, 2006 *International Building Code*, International Code Council, 2006.
- 김동수, 방은석, 서원석, "표준관입시험을 이용한 업홀시험에서 전단파 속도 주상도의 도출", 한국지반공학회 논문집, 제19권, 2호, 2003, pp. 39-50.
- 선창국, 강병수, 김영수, 목영진, "인홀 시험을 이용한 암반의 동적 강성 평가", 지질공학, 제15권, 3호, 2005, pp. 309-323.
- 선창국, 목영진, 정충기, 김명모, "스프링식 횡방향 발전 크로스홀 탄성파 시험을 통한 지반 동적 특성의 합리적 산정", 한국지진공학회 논문집, 제10권, 4호, 2006, pp. 1-13.
- 김홍중, 선창국, 조성민, 허열, "SCPT에서 지반의 깊이별 전단파 속도 결정 과정에 대한 분석", 대한토목학회논문집, 제25권, 3C호, 2005, pp. 201-214.
- Boore, D.M., "Estimating $\bar{V}_s(30)$ (or NEHRP Site Classes) from Shallow Velocity Models (Depths < 30 m)," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, 2004, pp. 591-597.
- 선창국, 양대성, 정충기, "서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제9권, 4호, 2005, pp. 29-42.
- 선창국, 정충기, 김동수, "국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계 제안", 한국지반공학회 논문집, 제21권, 6호, 2005, pp. 101-115.
- Borchardt, R.D., "Estimates of Site-dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification)," *Earthquake Spectra*, Vol. 10, 1994, pp. 617-653.
- 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.
- Anderson, J.G., Lee, Y., Zeng, Y. and Day, S., "Control of Strong Motion by the Upper 30 Meters," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, 1996, pp. 1749-1759.
- Joyner, W., Warrick, R. and Fumal, T., "The Effects of Quaternary Alluvium on Strong Ground Motion in the Coyote Lake," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, 1981, pp. 1333-1349.
- Wills, C.J., Petersen, M., Bryant, W.A., Reichle, M., Saucedo, G.J., Tan, S., Taylor, G. and Treiman, J., "A Site-conditions Map for California Based on Geology and Shear-wave Velocity," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, 2000, pp. 187-208.
- 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.
- 윤종구, 김동수, 방은석, "국내 지반 특성에 적합한 지반분류

- 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (I) - 국내 내진 설계 기준의 문제점 분석”, 한국지진공학회 논문집, 제10권, 2호, 2006, pp. 39-50.
21. Devore, J.L., *Probability and Statistics for Engineering and the Science*, 3rd ed., Duxbury Press, Belmont, California, 1991.
22. Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D. and Abrahamson, N., *Characterization of site response general categories*, PEER Report 1999/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1999.
23. 윤종구, 김동수, 방은석, “국내 지반 특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (II) - 지반분류 개선방법”, 한국지진공학회 논문집, 제10권, 2호, 2006, pp. 51-62.