

## 우리나라 지진공학적 지반 분류를 위한 30m 미만 심도 평균 전단파 속도의 활용 Utilization of Mean Shear Wave Velocity to a Depth Shallower than 30m for Efficient Seismic Site Classification in Korea

선창국<sup>1)</sup>, Chang-Guk Sun, 정충기<sup>2)</sup>, Choong-Ki Chung, 김동수<sup>3)</sup>, Dong-Soo Kim

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원, Senior Researcher, Korea Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

<sup>2)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, Department of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

<sup>3)</sup> 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science & Technology

**SYNOPSIS :** Mean shear wave velocity of the upper 30m ( $V_{S30}$ ) used as the current site classification criterion for determining seismic design ground motions in Korea was established based on the typical depth of site investigations in western US, in which the depth to bedrock is much deeper than that in Korea. In this study, to establish appropriate site classification system for site conditions of Korea, site investigations including in-situ seismic tests to determine shear wave velocity ( $V_S$ ) were carried out at total 72 sites in Korean peninsula. The mean  $V_S$ 's to the depths of 5m, 10m, 15m, 20m and 25m together with the  $V_{S30}$  at the testing sites were determined, and the correlation between the mean  $V_S$  to a depth shallower than 30m and the  $V_{S30}$  was drawn and suggested for the efficient seismic site classification in Korea. The proposed correlation could be utilized for the seismic design in case of the  $V_S$  profiles shallower than 30 m in depth. The correlation in this study, nevertheless, requires further modification by means of the accumulation of various site data in Korea.

**Key words :** Site classification, Mean shear wave velocity, Seismic test, Bedrock depth, Site period

### 1. 서론

1990년대 후반 국내 내진 설계 관련 규정과 시설물별 세부 사항의 체계화가 시작된 이래로 현재까지 국내에서의 내진 설계 및 내진 성능 평가는 연구와 실무 적용이 병행되고 있다. 최근 해외의 강진 발생으로 인한 인명 및 구조물 피해 사례들과 더불어 한반도 주변의 강진 발생으로 인한 국내의 지역적 지진 안전성에 관련된 다각적 경각심이 대두되고 있는 가운데, 지진 운동의 중요한 영향 인자인 지반에 대한 지역적 특성 규명 연구 및 이를 통한 실무적 활용 방안 체계화가 요구되고 있다(Sun, 2004).

이러한 지반 및 지진공학적 요구를 충족시키기 위해서는 무엇보다도 지질 조건 및 동적 물성을 포함하는 지반 특성을 정확히 파악하고 부지 효과와 관련된 지진 전파 및 증폭 특성을 평가해야 한다. 부지 효과로 인하여 지진파는 기반암 상부의 토사 구성 지반을 통해 전달되는 과정 중에 대개 증폭되며, 그 증폭 정도의 정량적 크기는 주로 지반 특성에 따라 좌우된다. 현행 국내 내진 설계 기준에서도 부지 효과를 반영하기 위하여 지반 특성을 지반 분류 체계(site classification system)를 통해 정량적으로 구분

하고 있고, 이에 따른 지반 조건별 증폭 정도는 지진 계수(seismic coefficients) 내에 포함된 지반 증폭 계수(site coefficients)로 정량화하여 실무적 설계 지반 운동 결정에 활용하고 있다(건설교통부, 1997; 선창국 등, 2005b). 그러나 현행 국내 내진 설계와 성능 평가의 지반 분류 체계 및 지반 증폭 계수는 지역적 지반 고유 특성의 정량적 평가 없이 해외 강진 지역인 미국 서부 지역의 기준을 단순 준용하고 있다(Sun 등, 2005). 이러한 문제점의 개선의 일환으로 최근 국내의 지역적 지반 특성을 고려한 지반 분류 체계 및 지반 증폭 계수 합리화 목적의 몇몇 연구들(선창국 등, 2005b; 윤종구와 김동수, 2004)이 수행된 바 있다.

본 연구에서는 최근 국내 지반 분류 체계 합리화 연구들의 지속적 보완을 위한 분류 기준 효율화를 목적으로, 먼저 국내 다양한 부지를 대상으로 현장 지반 조사를 수행하여 지질 조건 및 지반 동적 특성을 평가하고, 국내 특성을 현행 지반 분류 체계의 근간인 미국 서부 지역의 특성과 비교하였다. 이를 토대로 미국 서부의 지역적 지반 특성에 근거한 기존 분류 체계를 국내 지반 특성에 적합하도록 보완한 효율화 방안을 평균 전단파 속도의 심도별 변화 분석 및 상관관계 정립을 통해 제안하고자 하였다.

## 2. 내진 설계를 위한 지반 분류 체계

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 전단파 속도(shear wave velocity,  $V_s$ )와 같은 동역학적 특성에 따른 응답 거동 차이로 크게 달라질 수 있다. 이와 같은 부지의 지진 응답 특성은 주기별 가속도나 속도로 표출되는 지진동의 크기 거동을 의미하며, 지표면 부근 구조물의 동적 응답에 직접적인 영향을 미치게 된다. 부지 효과에 따른 지진 증폭을 정량적으로 고려하기 위하여 현행 국내 내진 설계 기준(건설교통부, 1997)에서는 표 1에 제시된 바와 같이 지표면부터 30m 심도까지의 평균 전단파 속도( $V_{s30}$ )에 따라 지반을 5 종류로(A~E 또는  $S_A$ ~ $S_E$ )로 분류하여 적용하고 있다(선창국 등, 2005a; 2005b). 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 Criterion	A ( $S_A$ )	B ( $S_B$ )	C ( $S_C$ )	D ( $S_D$ )	E ( $S_E$ )	F ( $S_F$ )
$V_{s30}$ (m/s)	> 1500	760 ~ 1500	360 ~ 760	180 ~ 360	≤ 180	Requires site specific evaluation

현행 국내 지반 분류 기준은 표 1에 소개된  $V_{s30}$ (또는  $\overline{V_s}$ ) 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 전단파 속도( $V_s$ )를 의미하며, Borcherdt(1994)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(BSSC, 1997) 규정과 ICBO(1997)의 UBC(Uniform Building Code)에서 채택되었고, 이를 다시 국내 내진 설계 기준(건설교통부, 1997)에 반영한 것이다(Sun 등, 2005). 근본적으로 30m(100ft)는 지진학적 관점에서는 매우 얇은 심도로 간주될 수 있다. 그러나 기반암 심도(depth to bedrock,  $H$ )가 매우 깊은 미국 서부 지역에서의 일반적인 시추 및 상세 지반 조사 심도일 뿐만 아니라(Sun, 2004; Anderson 등, 1996) 지표면 부근 얇은 심도의 지질 조건 및 지반 동적 특성이 부지 고유의 지진 응답에 다른 영향 인자에 비해 상대적으로 매우 큰 영향을 미치므로(Wills 등, 2000), 30m 심도까지의 지반 특성은 지진공학 측면에서 유용하다고 할 수 있다. 이와 같은 다각적 측면의 고려를 통해  $V_{s30}$ 을 부지 효과를 반영하는 지반 분류의 기준으로 설정하였다(Dobry 등, 1999).  $V_{s30}$ 은 식 (1)과 같이 결정할 수 있으며, 수식적으로는 산술 평균이 아닌 기하 평균을 의미한다.

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

여기서,  $d_i$ 와  $V_{Si}$ 는 각각 지하 30 m까지 분포하는  $i$ 번째 지층의 두께( $\sum d_i=30$  m)와 평균 전단파 속도 아래 식 (2)도 지하 30m까지의 평균 전단파 속도이지만, 산술 평균을 의미한다. 자연 상태의 지반 조건에서는 거의 모든 경우에  $V_{S30}$ 이  $V_{S30\text{arithmetic}}$  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 전단파 속도로서, 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 고체 입자를 통해 전파되는 전단파 속도가 활용되어 왔고(Sun, 2004), 대상 지역의 대표적 구성 지층의 평균적인 전단파 전달 속도를 반영하고 정량적 기준이라는 측면에서  $V_{S30}$ 은 부지 효과와 관련된 매개 변수로서 유용하다고 할 수 있다. 그러나  $V_{S30}$ 은 기반암 심도를 직접 또는 기하학적으로 고려하는 대신, 30m보다 얕은 심도에 존재하는 기반암의 전단파 속도 값을 식을 통해 계산적으로 반영하고 있고(Kim 등, 2002), 전단파 속도의 깊이에 따른 분포 형상을 적절하게 고려할 수는 없다는 문제점이 있다(선창국 등, 2005a). 이러한 부분은 지역적 고유성, 실무적 편의성, 지진 응답 예측의 정확성 등을 종합적으로 감안하여 개선 및 보완해야 할 것으로 보이며, 최근 국내와 더불어 미국을 포함한 해외에서도 여러 개선 연구들이 진행되어 왔다(Sun, 2004).

국내와 미국의 내진 설계를 위한 지반 분류 체계 관련 최근의 여러 개선 연구들을 살펴보면, 미국의 경우 주로 분류 체계만을 보완 대상으로 한정하여 연구를 수행해 온 반면, 국내의 경우 지반 분류 체계와 더불어 지역적 지반 고유 특성을 고려한 지반 증폭 계수의 합리화 연구도 병행하고 있다.  $V_{S30}$ 을 대신하는 지반 분류 기준으로는 기반암 심도와 부지 고유 주기(site period,  $T_G$ )가 대표적이며(Sun, 2004), 부지 고유 주기는 기반암 심도와 같은 지질 조건과 더불어 동적 특성인 전단파 속도를 동시에 반영할 수 있는 합리적 지반 분류 기준으로 국내외의 여러 연구 결과(윤중구, 2006; Sun, 2004; Rodriguez-Marek 등, 1999)에서 제시되어 왔다. 부지 고유 주기는 각 부지의 기반암 상부 지층 두께와 그 전단파 속도를 토대로 식 (3)과 같이 결정할 수 있다. 고유 주기는 대상 부지의 지진시 대표적 공진 주기에 해당되므로 그에 상응하는 부지 고유의 지진 응답을 예측할 수 있다.

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

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

지반 분류 체계의 개선 및 보완은 분류 기준의 대체 뿐만 아니라 보다 다양한 지반 조건의 실질적 반영을 통한 내진 설계 합리화를 목적으로 하는 분류 범주의 세분화를 통해서도 진행되어 왔다(선창국 등, 2005b; Sun, 2004; Wills 등, 2000; Rodriguez-Marek 등, 1999). 특히, 선창국 등(2005b)은 국내 내륙의 대표적 부지들에 대한 지질 및 지반 특성을 종합적으로 평가하고, 지반 분류 C와 D의 경계 ( $V_{S30}=360\text{m/s}$ ) 부근에 밀집된  $V_{S30}$ 의 분포 경향을 근거로 지반 분류 범주인 C와 D의 세분화 및 세분화된 각 분류간 평균 개념의 중간 분류 방안들을 제안하였다. 또한, 국내 내륙의 지반 특성을 미국 서부 지역의 특성과 비교하여 국내 내륙의 기반암 심도가 미국 서부 지역에 비해 매우 얇게 분포하고 있음을 확인하고, 이를 토대로 기반암 심도가 깊은 미국 서부 지역의 일반적인 지반 조사 심도(30m)보다 얕은 심도의 평균 전단파 속도들을 보조적인 지반 분류 기준으로 제시하였다. 더불어 다양한 해석적 연구를

통한 국내 지반 증폭 계수의 합리화도 최근 활발하게 진행되고 있으므로(윤종구, 2006; 선창국 등, 2005a; 선창국 등, 2005b), 국내 지반 분류 체계의 합리화 및 효율화 연구의 병행을 통해 국내 내진 설계 지반 운동의 종합적이고 체계적인 결정이 가능할 것으로 판단된다.

### 3. 지반 조사를 통한 국내 지질 및 지반 동적 특성 결정

국내 고유의 지질 조건을 파악하고 지반 동적 특성을 평가하기 위하여 다양한 부지들을 대상으로 지반 조사를 수행하였다. 또한, 본 연구에서는 종합 평가된 국내 지반 특성을 현행 국내 지반 분류 체계의 근간인 미국 서부 지역의 지반 특성과 비교하여 상대적인 차이를 분석하였다.

#### 3.1 국내 대상 부지의 지반 특성

지반 조사는 국내 여러 지역을 대상으로 실시하였으며, 12 곳 지역 내의 총 72 개소 부지에서 수행되었다. 수행된 지반 조사 기법은 지반 층서 파악을 위한 시추 조사와 지반 동적 특성인 전단파 속도( $V_s$ )의 획득을 위한 현장 탄성과 시험으로 구성된다. 본 연구에서 수행된 현장 탄성과 시험은 시추공내 탄성과 시험과 표면파 기법인 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 시험이다. 시추 조사가 병행되지 않은 부지의 경우 기설정된 지층과  $V_s$ 의 관계를 토대로 지하 층서를 파악하였다(Sun 등, 2005). 부지별로 여건에 따라 차별적으로 적용된 현장 공내 탄성과 시험은 크로스홀(crosshole), 다운홀(downhole), 업홀(uphole) 및 인홀(inhole) 시험이고, 몇몇 부지에서는 관입 탄성과 시험인 탄성과 피에조콘 관입 시험(seismic piezocone penetration test)이 수행되었다. 연구 대상 지역의 위치와 각 지역 내 시험 부지 개수 및 시험 내용은 그림 1과 같고, 각 부지별 지반 조사 기법과 지반 조사로부터 파악된 부지 특성 및 지반 분류는 표 2에 제시하였다.

원지반의 깊이에 따른  $V_s$  분포를 결정하기 위한 여러 현장 탄성과 시험은 기법별로 수행 분석 방법 뿐만 아니라 신뢰도도 다소 차이를 보이게 되며, 일반적으로 표면파 시험에 비해서는 공내 탄성과 시험의 신뢰도가 높고 그 중에서도 크로스홀 시험의 신뢰도가 가장 높은 것으로 알려져 있다(Kim 등, 2002). 또한, 현장 여건 및 시험 장비의 한계로 인해 단일 기법만을 적용할 경우 대상 부지의 지표면부터 기반암까지의 모든 심도에 대한  $V_s$  획득이 어려울 수 있고, 시험기법의 신뢰도도 차이가 있을 수 있으므로 경우에 따라서는 단일 부지에서 여러 현장 탄성과 시험을 병행하고 대표  $V_s$ 를 결정함으로써 부지 동적 특성을 평가하였다(그림 2). 특히, 다운홀 시험의 경우에는 지표면에서 발진된 탄성과의 지반 내 반사 및 소산으로 소정 심도까지의  $V_s$  분포가 획득되지 못하고 지표면 부근의  $V_s$  분포만이 획득되기도 하는 반면, 다운홀 시험에 비해 깊은 심도에서 신뢰성이 다소 낮아질 수 있는 표면파 기법의 SASW 시험에서는 발진원 및 현장 여건에 따라 깊은 심도까지의  $V_s$  분포를 구할 수도 있다. 본 연구에서는 대상 부지별 동적 특성으로서 깊이에 따른 대표  $V_s$  분포를 결정하였으며, 대표적인 부지들의  $V_s$  깊이 분포들을 그림 2에 제시하였다.

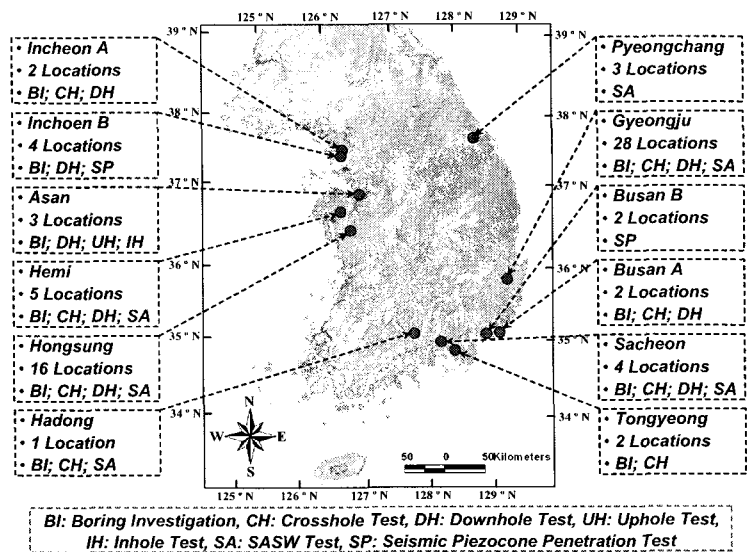


그림 1. 대상 지역 정보 및 지반 조사 내역

표 2. 대상 부지의 지반 조사 정보 및 특성

Site Name <sup>†</sup>	Investigation Methods	H (m)	V <sub>30</sub> (m/s)	Site Class	T <sub>G</sub> (sec)	Site Name <sup>†</sup>	Investigation Methods	H (m)	V <sub>30</sub> (m/s)	Site Class	T <sub>G</sub> (sec)
GJ01	BI, CH, DH, SA	8	669	C	0.062	HS09	SA	28	327	D	0.300
GJ02	BI, CH, DH, SA	11	457	C	0.194	HS10	BI, CH, DH, SA	45	316	D	0.356
GJ03	BI, DH, SA	28	432	C	0.127	HS11	SA	24	337	D	0.258
GJ04	BI, DH, SA	19	381	C	0.193	HS12	SA	24	372	C	0.262
GJ05	BI, DH, SA	45	367	C	0.350	HS13	SA	24	362	C	0.240
GJ06	BI, DH, SA	31	382	C	0.242	HS14	SA	16	398	C	0.202
GJ07	BI, DH, SA	16	357	D	0.211	HS15	BI, CH, DH, SA	47	345	D	0.402
GJ08	SA	25	327	D	0.264	HS16	SA	28	332	D	0.267
GJ09	SA	14	561	C	0.128	SC01	BI, CH, DH, SA	8.7	854	B	0.064
GJ10	SA	50	412	C	0.421	SC02	SA	12	606	C	0.096
GJ11	SA	30	420	C	0.247	SC03	SA	12	625	C	0.096
GJ12	SA	14	616	C	0.107	SC04	SA	11	763	B	0.080
GJ13	SA	30	359	D	0.264	HM01	BI, CH, DH, SA	16	696	C	0.073
GJ14	BI, CH, DH, SA	38	385	C	0.299	HM02	SA	15	567	C	0.121
GJ15	BI, CH, DH	5	844	B	0.042	HM03	SA	23	532	C	0.161
GJ16	BI, DH, SA	32	397	C	0.229	HM04	SA	23	497	C	0.159
GJ17	BI, DH, SA	35	311	D	0.274	HM05	SA	23	594	C	0.134
GJ18	BI, DH	30	374	C	0.261	HD01	BI, CH, SA	12	472	C	0.205
GJ19	SA	2	1194	B	0.016	PC01	SA	74	443	C	0.541
GJ20	SA	8	1245	B	0.040	PC02	SA	55	504	C	0.377
GJ21	SA	16	535	C	0.144	PC03	SA	24	563	C	0.186
GJ22	SA	12	510	C	0.118	AS01	BI, DH, UH, IH	27	308	D	0.374
GJ23	SA	16	487	C	0.157	AS02	SA	31	296	D	0.411
GJ24	SA	20	497	C	0.158	AS03	SA	31	321	D	0.379
GJ25	SA	16	569	C	0.132	BSA01	BI, CH, DH	24.5	313	D	0.460
GJ26	SA	14	431	C	0.162	BSA02	BH, DH	30	300	D	0.400
GJ27	SA	40	411	C	0.325	ICA01	BI, CH, DH	37	220	D	0.605
GJ28	SA	36	439	C	0.244	ICA02	BI, DH	37	278	D	0.499
HS01	BI, DH	32	301	D	0.281	TY01	BI, CH	8	1225	B	0.056
HS02	SA	32	319	D	0.333	TY02	BI, CH	8.5	1310	B	0.048
HS03	SA	30	309	D	0.306	BSB01	SC	79	138	E	1.397
HS04	SA	26	359	D	0.240	BSB02	SC	55	136	E	1.328
HS05	BI, DH, SA	40	244	D	0.416	ICB01	BI, DH, SC	50	175	E	0.938
HS06	BI, CH, DH, SA	11	491	C	0.137	ICB02	BI, DH, SC	50	175	E	0.916
HS07	BI, DH, SA	30	343	D	0.286	ICB03	BI, DH, SC	50	181	D	0.901
HS08	SA	35	331	D	0.350	ICB04	B, D, P	50	178	E	0.903

<sup>†</sup>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)

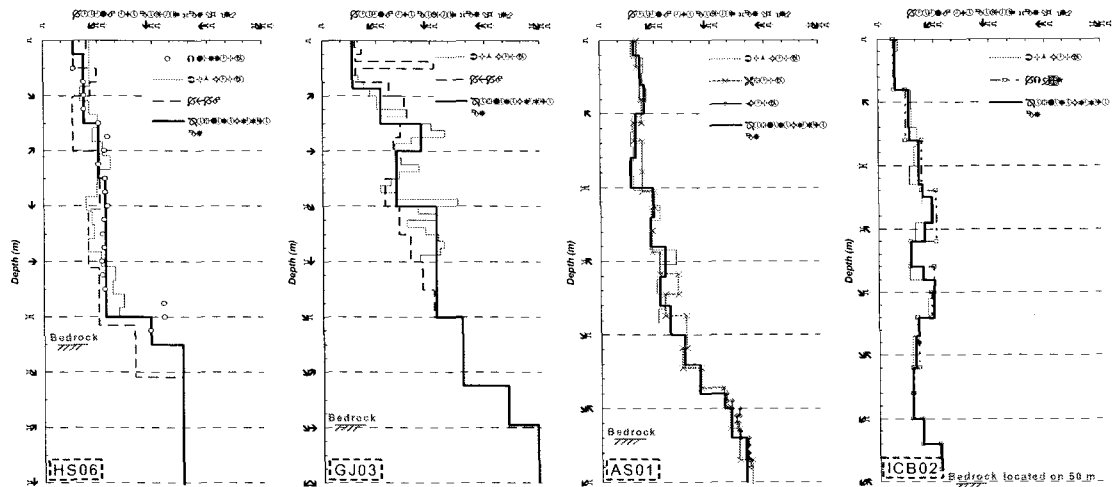


그림 2. 대상 부지의 깊이에 따른 대표 전단파 속도 분포 결정

시험 대상 부지의 전체적인  $V_s$  분포는 그림 3과 같으며, 범례에는 부지별 기반암 심도를 괄호 내에 표시하였다. 대체로 국내 부지에서는 기반암 심도가 깊은 경우 30~50m 정도의 분포를 보였고 일부 부지에서는 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 대체로 국내 부지들은 지반 분류 C 또는 D에 해당되었으며, 그로 인해 전반적으로 전체 부지의 평균  $V_s$ 가 지반 분류 C와 D의 평균  $V_s$ 들의 중간적인 분포 경향을 보였다. 그러나 약 10m 심도까지의 지표면 부근 영역에서는 전체와 지반 분류 C의 평균  $V_s$  분포가 유사하게 나타났다.

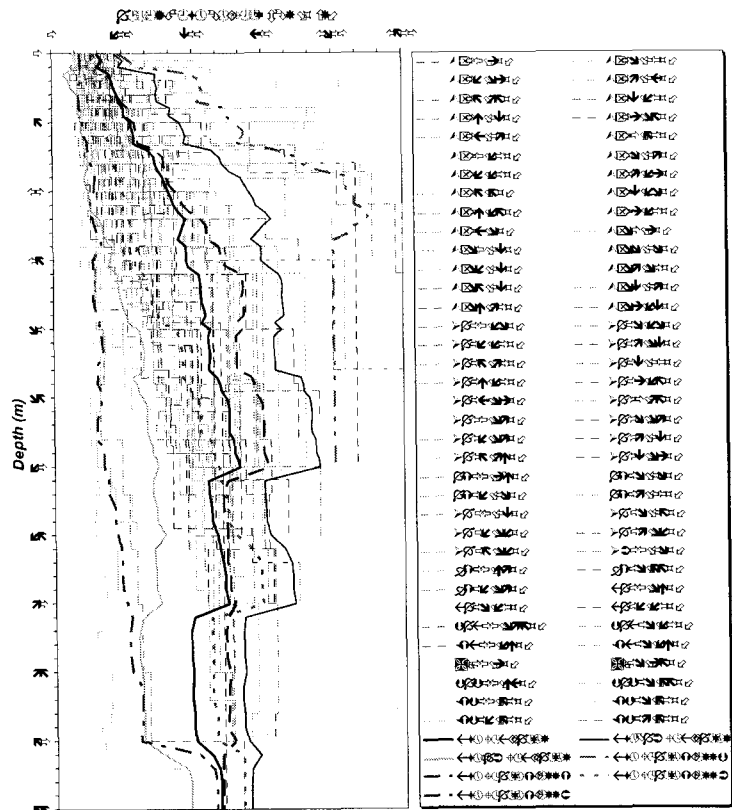
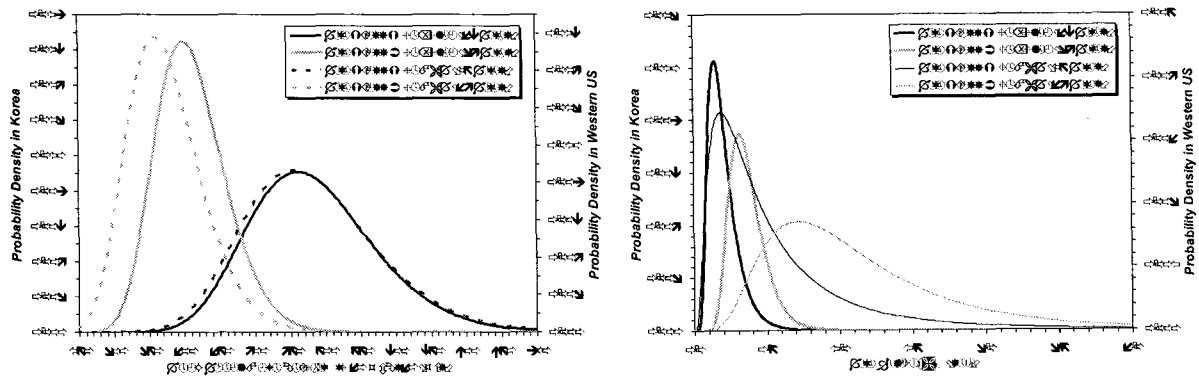


그림 3. 국내 부지의 전단파 속도와 속도 분포

### 3.2 국내와 미국 서부 지역의 지반 특성 비교

현행 국내 지반 분류 체계의 근간인 미국 서부 지역의 지반 특성과 국내 부지의 지반 특성을 비교하고 분석한 기존의 여러 연구들(Sun 등, 2005; 윤종구와 김동수, 2004; Sun, 2004)에서 이미 확인된 바와 같이, 국내의 경우 미국 서부 지역에 비해 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 부지들과 본 연구 대상 부지들의 지반 특성 차이를 파악하고자 국내의 주요 지반 분류 범주인 C와 D의  $V_{s30}$ 과  $T_c$ 의 분포를 비교 도시하였다. 지반 특성인  $V_{s30}$ 과  $T_c$ 는 0보다 큰 값으로만 존재할 수 있으므로 확률 밀도 분포는 대수정규 분포(lognormal distribution)로 가정하였고(Devore, 1991), 확률 분포 결정에 이용된 자료 수는 범례(그림 4)에서 확인할 수 있다.



(a) 심도 30m까지의 평균 전단파 속도와 속도 ( $V_{s30}$ )

(b) 지반 고유 주기 ( $T_c$ )

그림 4. 국내와 미국 서부 지역의 지반 분류 C와 D에 대한 지반 특성 분포

현행 지반 분류 기준인  $V_{s30}$ 의 경우 그 값의 결정시 기반암 심도보다는 지표면 부근 토사 강성인  $V_s$ 가 주요 영향 요인으로 작용하게 되므로, 상대적으로 강성이 커서 두 지역의 지표 부근 지반 특성 차이가 작은 지반 분류 C의 경우 그림 4(a)에서와 같이 국내와 미국 서부 지역의 분포 경향이 매우 유사하게 나타났다. 그러나 지반 분류 D 조건에서는 국내 부지의 대부분이 지반 분류 C와 D의 경계 ( $V_{s30}=360\text{m/s}$ ) 부근에 밀집 분포된 반면 미국 서부 지역 부지는 지반 분류 D의 전체 범위 ( $180\text{m/s} < V_{s30} \leq 360\text{m/s}$ )에 걸쳐 고르게 분포되어 그 경향이 다소 차이를 보였다. 이러한  $V_{s30}$ 의 분포 경향과는 달리  $T_c$ 의 경우 기반암 심도가 그 값의 결정에 주요 영향 요인으로 작용하므로 두 지역의 분포가 매우 다르게 나타났다. 즉, 동일한 지반 분류 범주에서도 기반암 심도가 깊은 미국 서부 지역의  $T_c$ 는 단주기부터 중장주기에 걸쳐 분포하는 반면, 기반암 심도가 얇은 국내 지역의  $T_c$ 는 주로 0.5 초 미만의 단주기에 분포한다. 이러한  $T_c$ 의 분포 차이로부터 국내와 미국 서부 지역의 주기별 지진 응답 특성 차이를 추정할 수 있으며, 기존의 여러 연구들(선창국 등, 2005a; Sun 등, 2005; 윤종구와 김동수, 2004; Sun, 2004)에서도 그러한 차이를 정량적으로 확인할 수 있다. 따라서 국내와 미국 서부 지역 지반 특성 중 가장 명확한 차이는 기반암 심도이며, 이를 고려하여 본 연구에서는 현재의 30m보다 얇은 심도까지의 평균  $V_s$ 의 활용을 통해 국내 지반 분류 체계의 효율화를 도모하였다.

#### 4. 활용 심도별 평균 전단파 속도간 상관관계

현행 국내 내진 설계의 지반 분류 기준인 심도 30m까지의 평균  $V_s$  ( $V_{s30}$ )는 기반암 심도가 깊은 미국 서부 지역 부지들의 지표면 부근 동적 특성으로서의 경험적 지표의 의미하므로, 국내와 같이 기반암 심도가 얇은 지역에서는 30m보다 얇은 심도까지의 평균  $V_s$ 도 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 이러한 활용 방안 및 필요성은 최근 국내 내륙 부지 응답 특성의 정량적 평가 관련 연구들(선창국 등, 2005b; Sun 등, 2005)에서  $V_{s20}$ ,  $V_{s15}$  그리고  $V_{s10}$ 의 규격화된 추가 기준들의 형태로 소개된 바 있다. 본 연구에서는 기존 연구의 일부 부지들을 포함한 보다 다양한 조건 부지들에서의 지반 특성을 토대로 30m 이하 임의의 심도( $D_s$ )까지의 평균  $V_s$  ( $V_{sD_s}$ )를 기존  $V_{s30}$  이외의 추가적인 지반 분류 기준으로 제시하기 위하여  $V_{s30}$ 과  $V_{sD_s}$ 의 상관관계를 도출하고자 하였다. 이런  $V_{sD_s}$ 의 활용은 30m까지  $V_s$ 가 획득되지 못한 경우에도 내진 설계를 위한 지반 분류 및 그에 따른 설계 지반 운동 결정을 가능케 하므로, 기존 지반 동적 특성 조사 자료의 활용성을 배가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

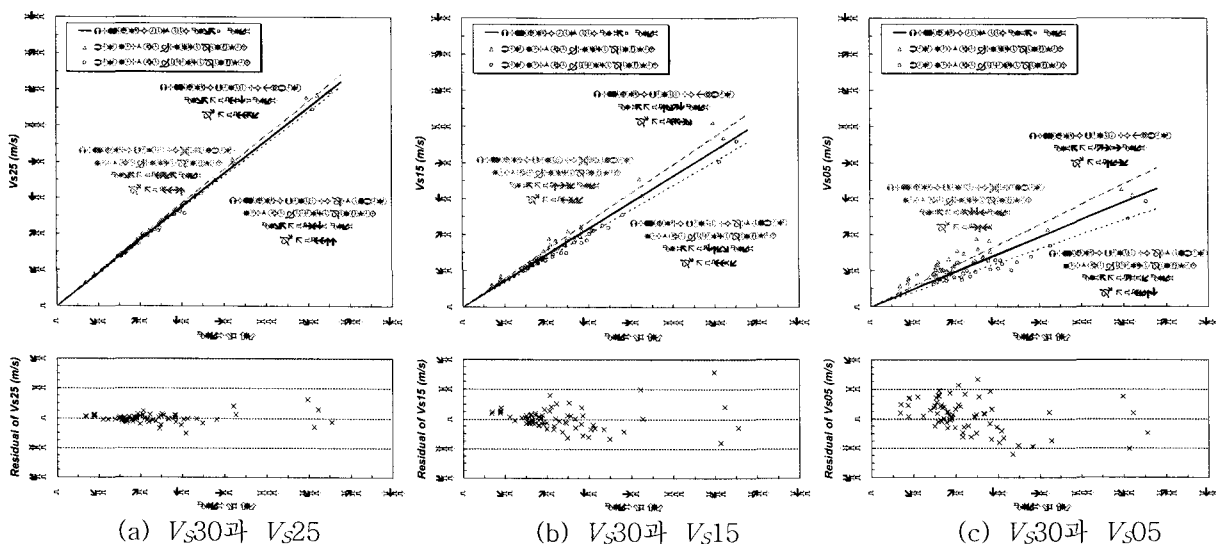


그림 5.  $V_{s30}$ 과  $V_{s25}$ ,  $V_{s15}$  및  $V_{s05}$ 의 상관관계와 잔차

본 연구에서는 국내 지역에 대한  $V_{s30}$ 과  $V_sDs$ 의 상관관계를 도출하기 위하여 조사 부지 72 개소의 깊이에 따른  $V_s$  분포를 토대로 30m보다 얇은 심도인 25m, 20m, 15m, 10m 그리고 5m까지의 평균  $V_s$ 들( $V_{s25}$ ,  $V_{s20}$ ,  $V_{s15}$ ,  $V_{s10}$  그리고  $V_{s05}$ )을 산정하고  $V_{s30}$ (표 2 참조)과 각각 선형 회귀 분석을 실시하였다. 5 종류의  $V_sDs$ 들에 대한 회귀 분석 과정 중 잔차(residual) 분석도 수행하였다. 그림 5는 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 얇아질수록 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 상관관계 뿐만 아니라 양의 잔차와 음의 잔차를 보이는 자료들에 대한 추가 회귀 분석을 실시하여 각각 상한과 하한의 상관관계를 확인하였으며, 상한과 하한 선형 상관관계간 이격 폭의 증가( $V_{s25} < V_{s15} < V_{s10}$ ) 정도를 통해 활용 심도가 다른  $V_sDs$ 간의 상관도 차이를 가시적으로 파악할 수 있다.

비록  $V_sDs$ 의 활용 심도가 얇아질수록 상관성이 떨어지는 경향은 있으나, 국내 72 개소 부지의 자료에 기반한 5 종류의 분석 과정에서 전체적으로 매우 높은 결정계수(0.7383~0.9953)를 보임에 따라 양호한 상관성을 확인하였다. 그림 6에는 5 종류의 전체  $V_sDs$ 들과  $V_{s30}$ 의 상관관계를 종합 도시하였으며, 활용 심도가 얇아질수록  $V_{s30}$ 을 변수로 하는  $V_sDs$ 의 경험적 관계식의 기울기가 작아지는 경향을 보인다. 본 연구에서는 이러한 기울기 감소 경향의 정량화를 통해 30m 보다 얇은 임의의 심도까지의 평균  $V_s$ 를 이용하여 현행 지반 분류 기준인  $V_{s30}$ 을 산정할 수 있는 일반적인 형태의 경험적 상관관계식을 도출하고자, 기울기(그림 6 내에 표현된 5 종류 상관관계식)를 평균  $V_s$  계수(coefficient for mean  $V_s$ ,  $C_s$ )로 정의하고 30m 이하의 평균  $V_s$  심도(depth for mean  $V_s$ ,  $D_s$ )와의 비선형 회귀 분석을 실시하였다. 그림 7은  $D_s$ 와  $C_s$ 의 상관관계 곡선으로서  $V_{s30}$ 과  $V_sDs$ 들의 상한 및 하한 상관관계(그림 5 참조)를 토대로  $D_s$ 와  $C_s$ 에 대한 상한 및 하한으로 재분석된 관계 곡선(굵은 파선 및 굵은 점선)도 확인할 수 있다. 또한, 상관도를 의미하는 결정계수( $R^2$ )와  $D_s$ 의 관계도 비교 도시하였다. 이러한 상관 분석 결과로부터 식 (4)와 같은  $V_{s30}$ 과  $V_sDs$ 의 일반적인 상관관계식을 도출하였으며, 국내와 같이 기반암 심도가 얇은 지역의 지반 분류를 위한 추가적이고 효율적인 기준을 위한 방안으로 제시하였다.

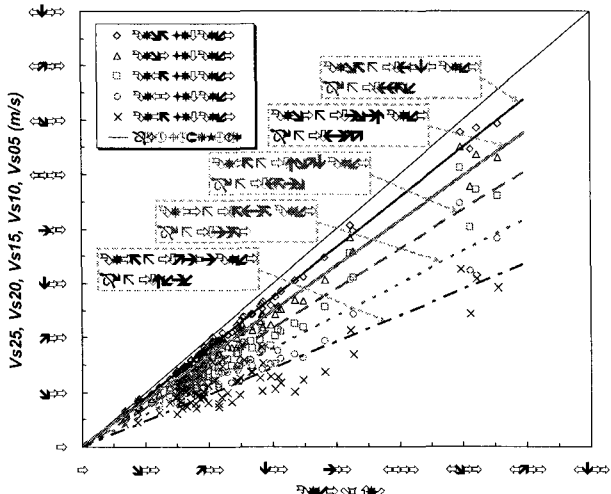


그림 6.  $V_{s30}$ 과  $V_sDs$ 들 간의 상관관계

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

더욱이 본 연구에서 제시한  $V_{s30}$ 과  $V_sDs$ 의 상관관계식을 통해 지층이 불균질하여 깊은 심도까지  $V_s$  분포를 결정하지 못한 현장 탄성과 시험 자료나 탄성파피에조콘관입 시험(SCPT<sub>U</sub>) 또는 탄성파딜라토미터 관입 시험(SDMT) 자료와 같이 관입 한계로 인해 제한된 심도의  $V_s$  분포만이 획득된 자료도 내진 설계 기초 자료로서 활용 가능할 것으로 판단된다. 그렇다 할지라도 보다 다양한 부지의 특성 자료 축적을 통한 상관관계 개선이 필요할 것으로 보인다. 현재까지의 자료에 근거한 그림 7의 깊이( $D_s$ )에 따른 결정계수( $R^2$ )의 정량적 변화를 살펴볼 때, 활용 심도( $D_s$ )가 얇아질수록 비선형적으로 결정계수가 감소하고 있으며, 특히 10m보다 얇을 경우 상관도는

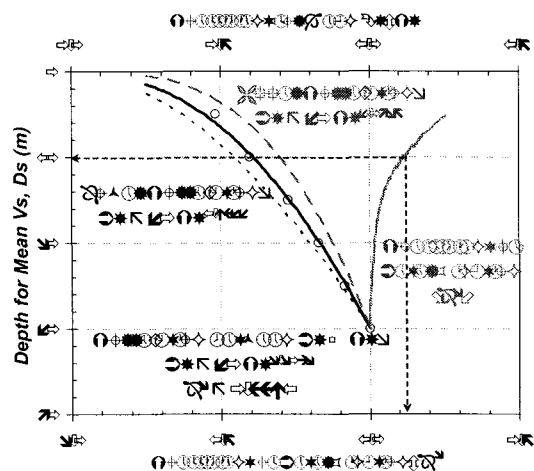


그림 7.  $D_s$ 와  $C_s$ 의 상관관계 및  $R^2$  분포



현저히 낮아지므로 현장에서 최소 10m 이상의 깊이에 따른  $V_s$  분포를 획득하여 내진 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 분류를 수행함이 바람직할 것으로 보인다. 따라서 부지 특성 자료의 여건에 따른 차선의 분류 기준으로서 10m이상 30m 이하 심도까지의 평균  $V_s$ 가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 도출된 상관관계의 구체적 활용 예로서 본 연구에서는 표 3과 같이 선창국 등(2005b)이 국내 내륙 지역에 대해 제안한 지반 분류 체계의 효율적 개선 방안을 제시하였다.

표 3. 국내 내륙 지역의 증폭 계수 결정을 위한 개선된 지반 분류 체계

Generic Description	Site Class*	Criteria; Mean $V_s$ (m/s)		Site Coefficients		
		1st	2nd	$F_a$	$F_v$	
		$V_{s30}$	$V_s D_s^{**} [= C_s V_{s30} = (0.2143 D_s^{0.4529}) V_{s30}]$			
Rock	B	> 760	> 760Cs	1.00	1.00	
Weathered Rock and Very Stiff Soil	C	C1	620~760	620Cs~760Cs	1.20	1.03
		C2	520~620	520Cs~620Cs	1.40	1.07
Intermediate Stiff Soil	C	C3	440~520	440Cs~520Cs	1.60	1.12
		C4	360~440	360Cs~440Cs	1.80	1.17
Deep Stiff Soil	D	D1	320~360	320Cs~360Cs	2.00	1.22
		D2	280~320	280Cs~320Cs	2.20	1.27
		D3	240~280	240Cs~280Cs	2.40	1.32
		D4	180~240	180Cs~240Cs	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.

\*\*  $V_s D_s$  is the mean  $V_s$  to the depth shallower than 30 m, which is restricted to the depth deeper than 10 m.

## 5. 요약 및 결론

현행 국내 내진 설계 지반 분류 및 지반 증폭 계수의 근간인 미국 서부 지역에 비해 기반암 심도가 매우 얇은 우리나라 지반의 지역적 특성을 고려한 지반 분류 체계의 합리화와 더불어 지반 동적 특성 자료의 활용성 증진을 목적으로, 국내의 다양한 72 개소 부지를 대상으로 시추 조사 및 여러 현장 탄성파 시험을 수행하여 지반 조건 및 전단파 속도( $V_s$ )와 같은 지반 동적 특성을 결정하였으며, 이를 토대로 국내 고유의 지반 및 지진공학적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 현장 탄성파 시험을 통해 획득된  $V_s$  분포를 토대로 결정한 현행 지진공학적 지반 분류 기준인  $V_{s30}$ 에 따라 지반 분류를 실시한 결과, 국내 부지는 대부분 지반 분류 C와 D에 해당된다.
- (2) 국내 지역과 미국 서부 지역의 지반 분류 C 및 D에서의  $V_{s30}$ 과 부지 고유 주기( $T_c$ )의 분포 범위를 비교한 결과,  $V_{s30}$ 은 지반 분류 D에서 국내에 비해 미국 서부 지역이 다소 작은 영역에 분포되는 차이를 보였을 뿐 지반 분류 C에서는 두 지역이 매우 유사한 분포 경향을 나타냈다. 이러한  $V_{s30}$ 의 분포 경향과는 달리  $T_c$ 의 경우 지반 분류 C와 D 모두에서 기반암 심도의 차이로 인해 국내 지역은 대체로 0.5 초 미만의 단주기 영역에 분포한 반면, 미국 서부 지역은 단주기부터 장주기에 걸쳐 분포하고 지반 분류별 밀집 분포 영역의 주요  $T_c$ 도 국내에 비해 장주기 분포 경향을 보였다.
- (3) 국내 부지의  $V_s$  분포를 이용하여 25m, 20m, 15m, 10m 및 5m 심도까지의 평균  $V_s$ 들( $V_{s25}$ ,  $V_{s20}$ ,  $V_{s15}$ ,  $V_{s10}$  및  $V_{s05}$ )을 추가적으로 산정하고 현행 기준인  $V_{s30}$ 과의 상관 분석 결과, 전체적으로 결정계수가 0.7383~0.9953의 범위를 보이는 매우 양호한 상관성을 나타냈으며, 활용 심도가 높아질수록  $V_{s30}$ 을 변수로 하는 상관관계식의 기울기는 작아지고 상관성은 다소 떨어지는 경향을 보였다.
- (4) 미국 서부 지역 지반 특성을 토대로 설정된 현행  $V_{s30}$ 의 이용 심도인 30m에 비해 상대적으로 얇은 심도( $D_s$ )까지의 평균  $V_s$ ( $V_s D_s$ ) 적용을 통한 지반 분류 체계의 효율화를 위하여,  $V_{s30}$ 과  $V_{s25}$ ,  $V_{s20}$ ,  $V_{s15}$ ,  $V_{s10}$  및  $V_{s05}$  간의 도출된 5 종류 상관관계를 근거로  $V_{s30}$ 과  $V_s D_s$ 의 일반적인 상관관계식을  $V_{s30} = V_s D_s / (0.2143 D_s^{0.4529})$  으로 도출하였다. 도출된 상관관계는 제한적 자료에 근거하므로 지속적인 자료 확보 및 축적을 통한 개선이 필요할 것이다.

- (5) 도출된  $V_s30$ 과 30m 미만 평균  $V_s$  간의 일반적인 상관관계는  $V_s30$ 의 근간인 미국 서부 지역에 비해 상대적으로 기반암 심도가 얇은 우리나라 지반 조건에서 매우 효율적으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 현장이나 시험 여건에 따라 30m 미만 심도까지만 제한적으로 획득되어온 깊이에 따른  $V_s$  분포 자료의 내진 설계 활용성도 배가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 국내 내진 설계 합리화를 위한 실질적 활용 예로서, 국내 내륙 지역에 대해 제안된 기존 지반 분류 체계를 본 연구의  $V_s30$ 과  $V_sDs$ 간 상관관계의 적용을 통하여 개선 제시하였다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(1999), 내진 설계 기준 연구(II).
2. 선창국, 양대성, 정충기(2005a), "서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제 9권, 제 4호, pp.29~42.
3. 선창국, 정충기, 김동수(2005b), "국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계 제안", 한국지반공학회 논문집, 제 21권, 제 6호, pp.101~115.
4. 윤종구(2006), 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구, 박사학위 논문, 한국과학기술원.
5. 윤종구, 김동수(2004), "국내 지반특성에 적합한 설계지반운동 결정 방법에 대한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제 8권, 제 3호, pp.23~32.
6. Anderson, J. G., Lee, Y., Zeng, Y. and Day, S.(1996), "Control of strong motion by the upper 30 meters", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, pp.1749~1759.
7. Borchardt, R. D.(1994), "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)", *Earthquake Spectra*, Vol. 10, pp.617~653.
8. BSSC(1997), *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Part 1-Provisions, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington D. C.
9. Devore, J. L.(1991), *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 3rd ed., Duxbury Press, Belmont, California.
10. Dobry, R., Ramos, R. and Power, M. S.(1999), *Site Factor and Site Categories in Seismic Codes*, Technical Report MCEER-99-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
11. ICBO(1997), *1997 Uniform Building Code*, Volume 2 - Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials.
12. Kim, D. S., Chung, C. K., Sun, C. G. and Bang, E. S.(2002), "Site assessment and evaluation of spatial earthquake ground motion of Kyeongju", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, pp.371~387.
13. Rodriguez-Marek, A., Bray, J. D. and Abrahamson, N.(1999), *Characterization of Site Response General Categories*, PEER Report 1999/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
14. 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.
15. Sun, C. G., Kim, D. S. and Chung, C. K.(2005), "Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea", *Engineering Geology*, Vol. 81, pp.446~469.
16. Wills, C. J., Petersen, M., Bryant, W. A., Reichle, M., Saucedo, G. J., Tan, S., Taylor, G. and Treiman, J.(2000), "A site-conditions map for California based on geology and shear-wave velocity", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, pp.187~208.