

# 국내 지반특성에 적합한 설계지반운동 결정 방법에 대한 연구

## Evaluation of Earthquake Ground Motion Considering Dynamic Site Characteristics in Korea

윤종구\*      김동수\*\*  
Yoon, Jong-Ku      Kim, Dong-Soo

### 국문요약

본 논문에서는 국내 148개 지반에 대한 전단파속도 주상도, 기반암 깊이 및 지반의 동적변형특성을 획득하여 미국 서부해안지역의 지반특성과 비교하였고, 등가선형해석을 수행하였다. 해석은 1등급 붕괴방지수준인 0.154g를 암반노두에 적용하여 수행하였다. 해석결과 국내 지반특성에 적합한 증폭계수  $F_a$ 와  $F_v$ 는 UBC 기준의 증폭계수와 매우 다른 경향을 보였다. 단주기 증폭계수  $F_a$ 의 경우 UBC 기준보다는 큰 값이 얻어졌고, 장주기 증폭계수  $F_v$ 는 UBC 기준보다 작은 값으로 나타났다. 따라서, 국내 지반특성을 적절히 반영할 수 있는 설계지반운동 결정방법을 개선해야할 필요를 확인하였다.

주요어 : 부지응답해석, 설계응답스펙트럼, 증폭계수, 국부지반조건

### ABSTRACT

The local geologic and dynamic site characteristics, which include soil profiles, shear wave velocity profiles and depths to the bed rock were gathered from 148 sites all over the Korean peninsula and those values are compared to those in the western USA. Site response analyses were performed based on equivalent linear scheme using design rock-outcrop acceleration of 0.154g which corresponds to the collapse level of earthquake for seismic category I structure. The results show that the amplification factor based on Korean seismic design guideline underestimates the motion in short-period range and overestimates the motion in mid-period range. It is suggested that the existing Korean seismic guideline based on UBC is required to be modified considering dynamic site characteristics in Korea for the reliable estimation of site amplification.

Key words : ground response analysis, response spectra, site coefficient, local site condition

## 1. 서론

내진설계시 구조물에 작용하는 하중은 구조물이 들어서는 지역, 구조물의 중요도 및 하부지반조건 등에 의해 결정되고, 지역 및 중요도는 구조물의 설계 이전에 모두 결정되는 요소이므로 결국 지반조건이 하중 결정에 가장 큰 영향을 미친다. 그러나, 국내 내진설계기준을 이용하여 설계를 하다 보면 지반분류 방법이 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있고, 부지 고유의 증폭해석(지진응답해석) 결과와 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼을 비교해 보면 단주기와 장주기 영역에서 많은 차이를 보이고 있다.

우리나라의 경우 큰 규모의 지진이 자주 발생하지 않는 중약진 지역이고, 내진설계기준 제정을 위한 실지진 기록이 부족하여 외국의 내진설계기준을 토대로 국내 기준이 제정되었다. 특히, 설계지반운동 결정을 위한 부지증폭현상을 고려하는 방법의 경우 대부분 미국 UBC 기준을 따르고 있다.<sup>(1)-(3)</sup> 최근 개정된 미국 UBC 기준의 경우 미국 서부해안 지역의 지반에 적합하도록 작성된 기준이다. 따라서, 기반암이 대부분 30m 이내에 존재하고 장주기 영역 보다는 단주기 영역에서 응답스펙트럼의 증폭이 크게 나타나는 국내의

지반특성을 고려하면, UBC 기준을 그대로 사용하는 것은 문제가 될 수 있다.

본 논문에서는 국내 지반특성에 적합한 설계지반운동 결정방법을 개선하기 위하여 도시지역을 중심으로 148개 지반을 선정하여 미국 서부해안지역의 지반특성과 비교하였고 지진응답해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 단주기 및 장주기 증폭계수(지진계수)와 비교 분석하였으며, 국내 일반적인 지반특성에 적합한 증폭계수를 산정하여 보았다. 또한, 해석결과에서 얻어진 증폭계수를 바탕으로 국내  $S_b$ ,  $S_c$  및  $S_d$  지반에 적합한 설계응답스펙트럼을 작성하여 보았다.

## 2. 해석대상부지 및 입력물성치

해석대상지반은 전국의 도시지역을 중심으로 국내 지반의 특성을 가지는 풍화토와 풍화암이 발달된 지역 및 퇴적토가 발달된 지역에서 자료를 획득하거나 직접 시험을 수행하여 얻었다. 그림 1에는 해석대상지반의 위치를 지도상에 표시하였고, 해석대상부지에 대한 간략한 설명은 표 1에 나타내었다. 148개 지반을 건설교통부 상위개념 기준인 내진설계기준 연구(II)를 이용하여 지반분류 하였을 경우  $S_b$  지반에 해당하는 지반이 16개,  $S_c$  지반은 74개,  $S_d$  지반은 58개 이고, 각 지반종류별 상부 30m에 대한 전단파속도 주상도는 그림 2에 나타내었다.<sup>(1)</sup> 표 2에는 해석지반의 기반암 깊이 및 상부 토

\* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정  
(대표적자: jkyoon@bomun.kaist.ac.kr)

\*\* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2004년 8월 31일까지 화회로 보내 주시면 그 성과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2004. 2. 19 / 심사종료일 : 2004. 4. 10)

층 30m의 평균 전단파속도( $V_{s30}$ )를 정리하였다. 표 2를 살펴 보면  $S_B$  지반의 경우 기반암의 평균 깊이가 지하 6m 정도이고,  $S_C$  지반의 경우 지하 18.3m로서 20m도 채 안되는 것을 볼 수 있다.  $S_D$  지반의 경우도 평균 깊이가 23.5m로 상부 토층 30m 평균 전단파속도를 이용하여 지반을 분류할 경우 대부분의 지반에서 기반암의 물성이 토층 지반분류에 포함되고 있다.

해석대상지반의 대부분은 상부 토층에 매립토 및 층적토가 분포하고 있고, 하부층은 풍화토와 풍화암 및 기반암층으로 구성되어 있다. 이러한 층상구조는 국내 지반의 일반적인 층상구조로 판단된다. 일부 해안 지역은 해성 퇴적층이 많이 발달되어 있어 기반암이 깊은 깊이에 위치해 있고, 하천이 흐르는 유역의 경우 하상 퇴적층이 깊이 발달하여 기반암의 깊이가 지하 50m 이하에 존재하는 경우도 있었다.

지진응답해석에서 가장 중요한 입력물성치는 깊이에 따른 지반의 전단파속도 및 기반면의 위치이다. 지반의 전단파속도는 지반조사 기법에 많은 영향을 받으므로 신뢰성 있는 지반조사 기법으로 얻어진 전단파속도를 이용하는 것이 중요하다. 해석대상부지 148개 지반 중 다운홀, 크로스홀, SASW 및 SPS logging 시험 등의 현장 탄성파기법으로부터 얻어진 자료는 106개 지반이었고, 42개 지반의 경우 SPT-N값을 이용하여 경험적 상관식으로 전단파속도를 추정한 지반이었다. SPT N값을 기준으로 지반의 전단파속도를 추정할 경우 Yamazaki와 Umehara(1987)가 제안한 식(1)을 이용하여 산정하였다.<sup>(4)</sup>

$$V_s = 89.1 N^{0.34} \quad (1)$$

표 1 해석대상부지

부지 현황		부지 개수	전단파속도 획득방법
현장 종류	부지 위치		
지하철 공사현장	서울, 대전, 부산	8 개	SPT-N
지하철 공사현장	서울	8 개	downhole
APT 공사현장	서울, 부산, 경기 수원, 경기 파주, 경기 화성, 경남 함안, 경북 칠곡, 전남 장흥 등	34 개	SPT-N
장대 교량 부지	광주지역, 여주지역	11 개	downhole, SASW, SPS logging
항만 건설 현장	부산, 광양, 인천	13 개	SPS logging
일반도시지역	경북 경주	27 개	SASW, downhole, cross-hole
	충남 홍성	16 개	
철도 건설 현장	영동선, 경전선	17 개	downhole, SPS logging
고속도로 현장	중부내륙고속도로	5 개	downhole
국도 현장	성남, 장호원, 여주	9 개	downhole
합 계			148 개 부지

표 2 해석지반의 지반종류별 평균 기반암 깊이 및 전단파속도

	$S_B$			$S_C$			$S_D$		
	최소	최대	평균	최소	최대	평균	최소	최대	평균
기반암 깊이(m)	0.00	-14.0	-6.0	-3.0	-50.0	-18.3	-5.5	-47.0	-23.5
$V_{s30}$ (m/sec)	761.0	1244.8	961.0	373.8	729.4	488.8	191.8	369.6	312.7

여기서,  $V_s$  = 지반의 전단파속도(m/sec)

$N$  = 표준관입시험(SPT) N값

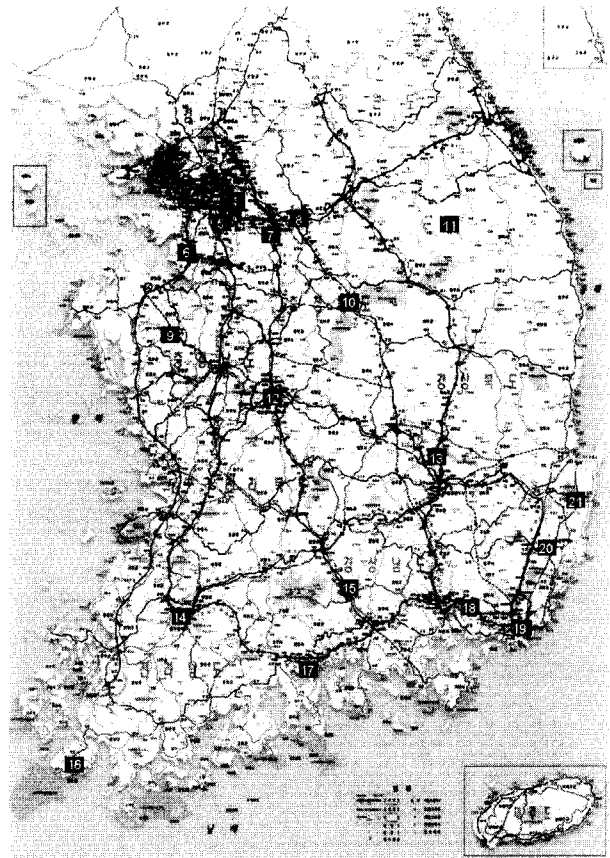


그림 1 해석대상지반 위치

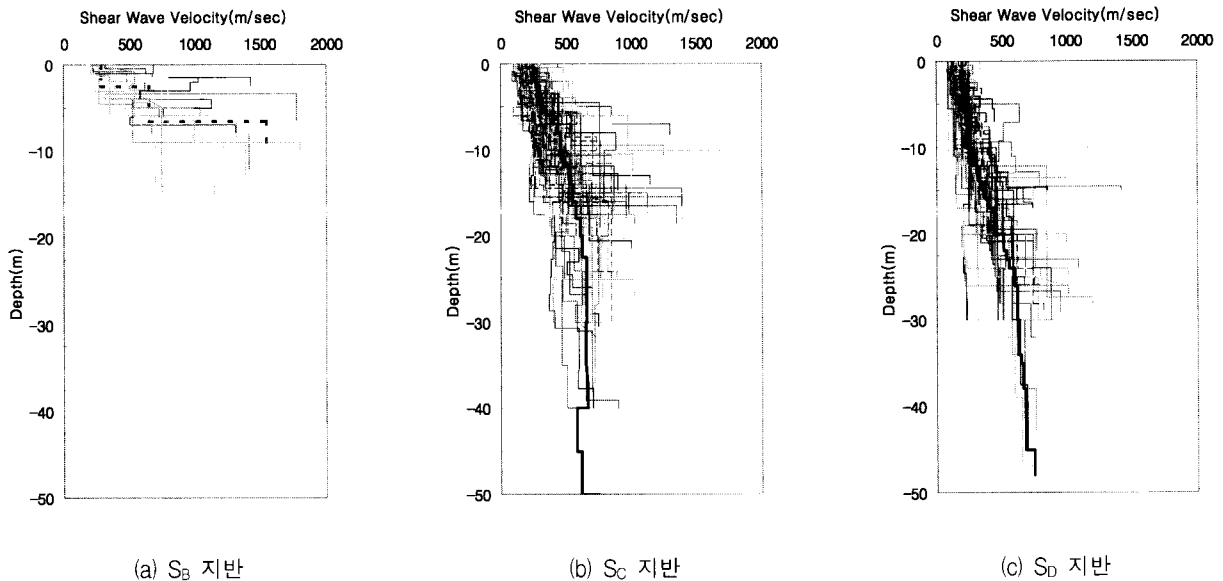


그림 2 지반종류별 깊이에 따른 전단파속도 주상도

본 해석에서는 1차원 지진응답해석에 널리 쓰이는 등가선형해석 프로그램인 SHAKE91을 이용하였다.<sup>(5)</sup> 지반응답해석에 필요한 지반의 동적 물성치인 변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선은 문헌의 자료와 국내 지반을 사용하여 실내실험에서 구한 데이터 베이스를 이용하여 결정하였으며<sup>(6)</sup>, 사용된 전단변형률의 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선은 그림 3에 나타내었다.

입력지진파의 경우 국내에서 측정된 실지진 기록이 없어 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research) 센터의 데이터를 이용하여 인공지진파 1개와 9개의 실제측 지진파를 이용하여 해석을 수행하였다.<sup>(7)</sup> 지진기록의 최대 가속도는 국내 내진설계기준의 1등급 붕괴방지수준에 해당하는 0.154g를 이용하였으며, 각 지진파의 시간이력곡선, 응답스펙트럼 및 계측 위치는 그림 4, 그림 5 및 표 3에 각각 나타내었다.

에 존재하는 미국 서부해안지역에서 기반암 깊이까지 지반조사를 일반적으로 할 수 없기 때문에 지진운동과 상관성이 큰 상부 토층 30m의 평균 물성치를 이용하여 내진설계를 하는 개념이다.<sup>(8),(9)</sup> 따라서, 기반암이 대부분 30m 이내에 존재하는 국내 지반에 그대로 적용할 경우 지반의 고유주기 영역이 다르고 구조물에 영향을 미치는 주파수 대역이 달라지게 되어, 경우에 따라서 과소 또는 과다 설계의 요인이 될 수 있다.

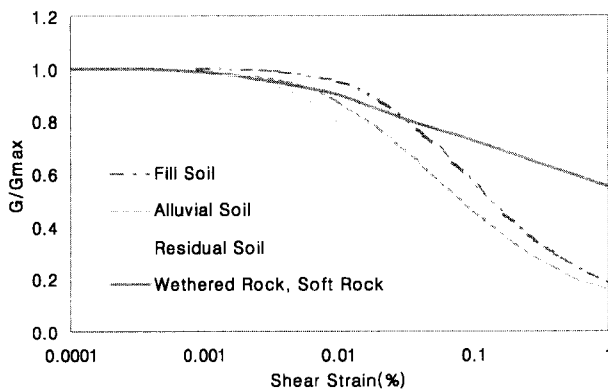
본 절에서는 국내 지반의 일반적인 특성과 미국 서부해안지역의 일반적인 특성을 비교하였다. 이를 위하여, 내진설계 기준연구(II)의 지반분류 방법으로 S<sub>B</sub>, S<sub>C</sub> 그리고 S<sub>D</sub> 지반으로 분류되는 148개 국내 지반과 미국 ROSRINE 프로젝트의 지반의 전단파속도 주상도를 비교하였고, 지반의 고유주기를 비교하여 지반특성의 차이를 살펴보았다.

### 3. 국내 지반특성과 미국 서부해안지반의 특성 및 설계기준의 비교

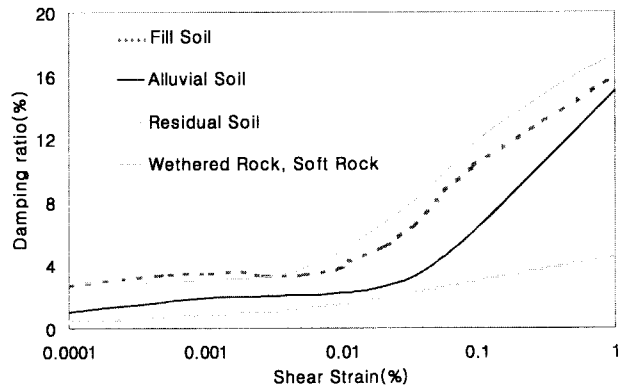
미국 UBC 기준의 경우 기반암이 지하 100m~300m 정도

#### 3.1 지반의 전단파속도 주상도 및 공진주기 비교

미국 서부해안지역 ROSRINE 프로젝트 현장지반의 전단파속도 주상도는 그림 6에 나타나 있다.<sup>(10)</sup> 그림 6의 경우 지반분류 없이 통합하여 나타난 그림이다. 그림 2의 국내의 일반



(a) G/G<sub>max</sub> Curve



(b) Damping Curve

그림 3 해석에 사용된 지반의 비선형 동적물성치(김동수, 추연욱, 2001)

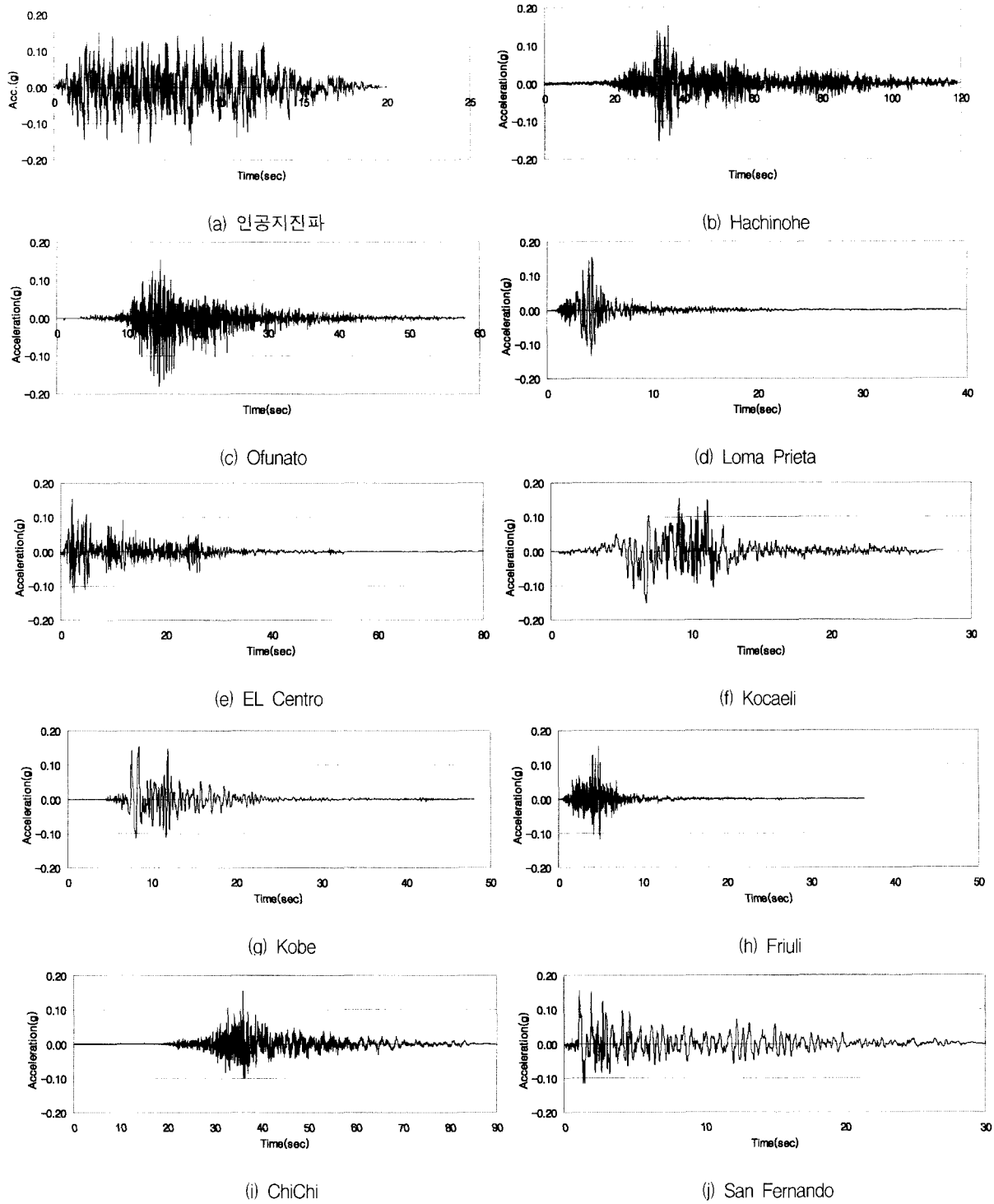


그림 4 해석에 이용된 지진파의 시간이력곡선

표 3 지진파 제원

지진파 이름	규모(Magnitude)	계측일	계측 위치	계측위치의 지반종류
인공지진	-	-	-	S <sub>B</sub>
Hachinohe	7.9	68년 5월 16일	일본 Tokachi-oki	S <sub>C</sub>
Ofunato	7.4	78년 6월 12일	일본 Miyagi-ken-oki	S <sub>D</sub>
Loma Prieta	6.9	89년 10월 18일	미국 캘리포니아	S <sub>A</sub>
EL Centro	5.2	79년 10월 15일	미국 캘리포니아	S <sub>C</sub>
Kocaeli	7.4	99년 8월 17일	터키 Kocaeli	S <sub>A</sub>
Kobe	6.9	95년 1월 16일	일본 Kobe	S <sub>B</sub>
Friuli	6.5	76년 5월 16일	이탈리아 Friuli	S <sub>B</sub>
ChiChi	7.6	99년 9월 20일	타이완 ChiChi	S <sub>A</sub>
San Fernando	6.6	71년 2월 9일	미국 캘리포니아	S <sub>A</sub>

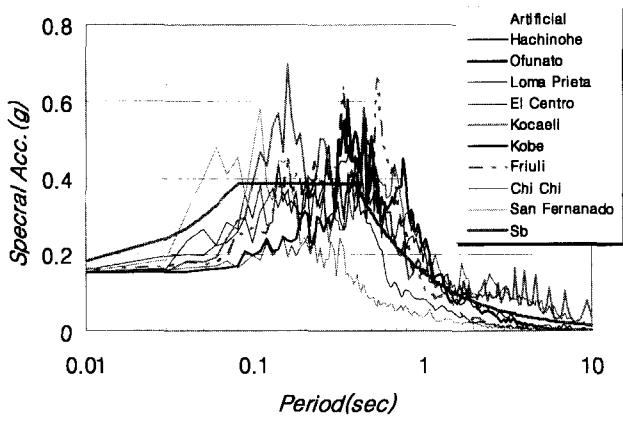


그림 5 해석에 이용된 지진파의 응답스펙트럼

적인 지반과 그림 6의 ROSRINE 프로젝트 현장지반을 비교해보면, 기반암의 깊이면에서 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. 대부분의 국내 지반의 경우 깊이 30m 이내에 기반암이 존재하지만, 미국 서부해안지역의 지반의 경우 깊이 100m - 300m 정도에 존재한다.

국내 지반과 ROSRINE 프로젝트 현장지반의 차이는 지반의 고유주기를 비교해 보면 더욱 명확해 진다. 기반암 상부 토층지반의 고유주기는 식(2)를 이용하여 계산하였고, 그림 7과 표 4에는 국내 지반의 고유주기와 ROSRINE 현장지반의 지반의 고유주기를 비교하였다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^{n_s} \frac{H_i}{V_{si}} \quad (2)$$

여기서,  $T_G$  = 지반의 고유주기 (sec)

$H_i$  =  $i$  번째 토층의 두께 (m)

$V_{si}$  =  $i$  번째 토층의 전단파속도 (m/sec)

국내  $S_c$  지반의 경우 고유주기의 평균값은 0.22초 정도이고,  $S_D$  지반의 경우 0.37초 정도이다. 그러나, 미국 서부해안 지역(Western US, WUS)의 경우 각각 0.50초와 1.20초 정도이다. 또한, 고유주기 영역의 폭을 비교하여 봐도 국내 지반의 경우 고유주기 영역이 매우 좁게 나타난 반면, 미국 서부해안지역의 경우 고유주기의 폭이 매우 넓게 분포되어 있는 특징을 보인다.

이와 같이 국내 지반과 미국 서부해안지역 지반의 고유주기가 큰 차이를 보이는 것은 식(2)에 나타난 바와 같이 지반의 고유주기가 기반암 깊이에 영향을 받기 때문이다. 그림 7의 결과를 살펴보면 국내 지반의 고유주기 범위는 ROSRINE 프로젝트 현장지반의 고유주기 범위보다 매우 좁게 분포한다. 이는 국내 지반의 경우 기반암 깊이가 깊지 않고, 기반암 위치의 분포 범위가 좁기 때문에 고유주기의 범위도 좁게 나타난다. 반면, ROSRINE 프로젝트 현장지반의 경우 기반암의 분포 범위가 넓어 고유주기의 분포가 넓게 나타난다. 따라서, 미국 서부해안지역의 지반조건에 적합하도록 작성된 미국

UBC 기준을 대부분 그대로 이용하고 있는 국내 내진설계기준의 검토가 필요한 것으로 판단된다.

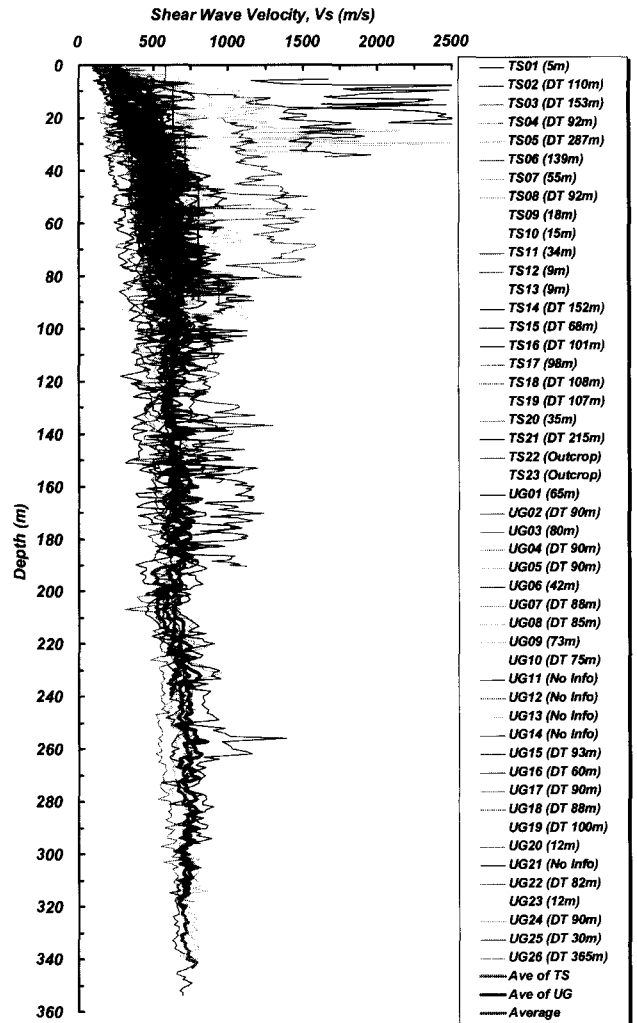


그림 6 ROSRINE 프로젝트 현장 지반의 전단파속도 주상도

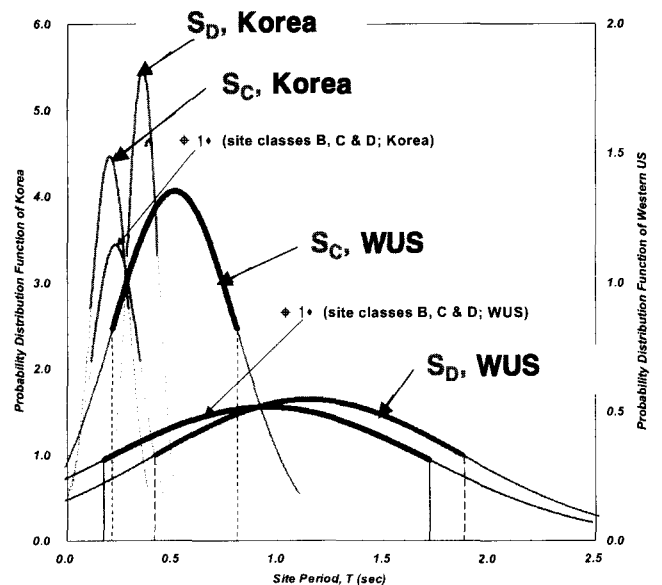


그림 7 국내 지반과 ROSRINE 현장 지반의 고유주기 비교 (WUS = the Western United States)

표 4 국내 지반과 ROSRINE 현장 지반의 고유주기

T (Sec)		S <sub>B</sub>			S <sub>C</sub>			S <sub>D</sub>		
		최소	최대	평균	최소	최대	평균	최소	최대	평균
	국내	0.00	0.10	0.06	0.07	0.42	0.22	0.24	0.67	0.37
	ROSRINE	-			0.30 ~ 0.80			0.40 ~ 1.90		

3.2 국내 내진설계기준과 미국 기준의 비교

전술한 바와 같이 국내 내진설계기준의 경우 미국 서부해안지역에 적합하도록 작성되어 있는 UBC 기준을 토대로 지반을 분류하고 설계지반운동을 결정하고 있다. 1997년에 개정된 미국 UBC 기준 및 국내 내진설계기준연구(II)에서 정의하고 있는 응답스펙트럼 작성방법은 각각 그림 8과 그림 9에 나타나 있다.<sup>(1),(3)</sup>

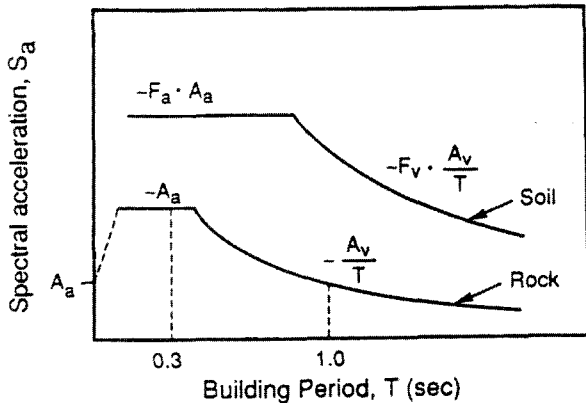


그림 8 1997년 UBC의 응답스펙트럼

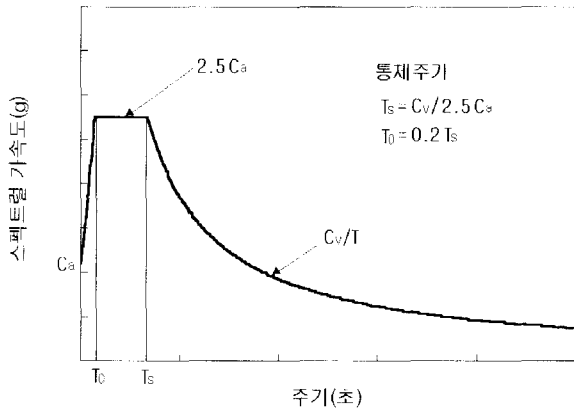


그림 9 내진설계기준연구(III)의 응답스펙트럼

표 5 지진세기와 지반 종류에 따른 F<sub>a</sub>값(NEHRP 1994, UBC 1997)

Soil Profile Type	Shaking Intensity				
	Aa≤0.1	Aa=0.2	Aa=0.3	Aa=0.4	Aa≥0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	
F	부지 고유의 특성 평가가 요구되는 지반				

그림 8의 미국 UBC의 경우 단주기 증폭계수 F<sub>v</sub>, 장주기 증폭계수 F<sub>v</sub>와 지진시 기반암 가속도 크기(Shaking intensity)의 크기에 따라 결정되는 A<sub>a</sub> 값과 A<sub>v</sub>를 이용하여 설계응답스펙트럼을 작성한다. 즉, UBC 기준의 경우 기반암 가속도 크기에 따른 단주기와 장주기의 증폭계수를 고려하여 설계응답스펙트럼을 작성한다. F<sub>a</sub>, F<sub>v</sub>, A<sub>a</sub>, A<sub>v</sub> 값은 표 5와 표 6에 나타나 있다.

표 6 지진세기와 지반 종류에 따른 F<sub>v</sub>값(NEHRP 1994, UBC 1997)

Soil Profile Type	Shaking Intensity				
	Aa≤0.1	Aa=0.2	Aa=0.3	Aa=0.4	Aa≥0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	
F	부지 고유의 특성 평가가 요구되는 지반				

국내 내진설계기준연구(II)의 경우 표 7과 표 8에 나타나 있는 C<sub>a</sub> 값과 C<sub>v</sub> 값을 이용하여 설계응답스펙트럼을 결정한다. 국내 기준의 C<sub>a</sub>와 C<sub>v</sub>값은 UBC 기준과 같이 기반암 가속도 크기인 A<sub>a</sub> 및 A<sub>v</sub> 값 대신 재현주기에 따른 위험도 계수(중요도계수)를 이용하여 설계응답스펙트럼을 작성한다.

표 7 지진계수 C<sub>a</sub> (건설교통부, 1997)

지반종류	지진구역	
	I	II
S <sub>A</sub>	0.09	0.05
S <sub>B</sub>	0.11	0.07
S <sub>C</sub>	0.13	0.08
S <sub>D</sub>	0.16	0.11
S <sub>E</sub>	0.22	0.17

표 8 지진계수 C<sub>v</sub> (건설교통부, 1997)

지반종류	지진구역	
	I	II
S <sub>A</sub>	0.09	0.05
S <sub>B</sub>	0.11	0.07
S <sub>C</sub>	0.18	0.11
S <sub>D</sub>	0.23	0.16
S <sub>E</sub>	0.37	0.23

UBC 기준의 설계응답스펙트럼과 내진설계기준연구(II)의 설계응답스펙트럼을 비교해 보면, 식(3)과 식(4)와 같이  $C_u$ 는  $F_u$ 와  $A_u$ 의 곱으로 표현할 수 있고,  $C_v$ 는  $F_v$ 와  $A_v$ 의 곱으로 표현할 수 있다.

$$C_u = F_u \cdot A_u \quad (3)$$

$$C_v = F_v \cdot A_v \quad (4)$$

예를 들어, 서울지역  $S_D$  지반에 1등급 붕괴방지수준으로 건설될 구조물을 내진설계기준연구(II)와 UBC 기준을 이용하여 지진계수를 산정하여 보면 표 9와 같이 구해진다. 서울지역  $S_D$  지반 1등급 붕괴방지수준의 경우 압반 노두의 가속도는 지역계수 0.11g, 재현주기 1,000년에 해당하는 위험도계수 1.4를 곱하여 0.154g를 얻을 수 있고, 표 7과 표 8을 이용하여  $C_u$ 값과  $C_v$ 값은 각각 0.224와 0.322가 된다. 여기서, 표 7와 표 8의 경우 500년 재현주기를 기준으로 한 값이므로, 1,000년 재현주기로 환산하려면 1.4를 곱해야 한다.<sup>(1)</sup> 이와 동일한 지역에서 UBC 기준을 이용하여 지진계수를 산정할 경우, 기반암 가속도가 0.154g 이므로  $A_u$ 와  $A_v$  값은 표 5와 표 6에서 선형보간법을 이용하여  $F_u$ ,  $F_v$ 값을 구할 수 있다. Shaking intensity가 0.154g이므로 0.10g와 0.20g의 중간값인 0.15g를 사용하면  $F_u$ 의 경우 1.5,  $F_v$ 의 경우 2.2가 얻어진다. 따라서, 식(3)과 식(4)를 이용하여  $C_u$ 와  $C_v$ 값을 계산하면  $A_u$ 와  $A_v$ 값이 0.15일 경우  $F_u$ 값과  $F_v$ 값은 각각 0.225와 0.330을 얻을 수 있다.

표 9 국내 기준과 UBC 기준의 증폭계수(지진계수)의 비교

	내진설계기준연구(II) 이용			UBC 1997 이용		
	재현주기 500년	위험도 계수	재현주기 1,000년	$F_u$ 또는 $F_v$	$A_u$ 또는 $A_v$	계산값
$C_u$	0.16	1.4	0.224	1.5	0.15	0.225
$C_v$	0.23	1.4	0.322	2.2	0.15	0.330

즉, 국내 기준과 UBC 기준은 적용하는 방식은 다르지만, 설계응답스펙트럼을 작성했을 경우 거의 동일한 것이 된다. 이는 미국 지반과 국내 지반의 특성에 많은 차이점이 있는 것을 고려하면 국내 내진설계기준의 경우 개선의 여지가 있음을 알 수 있다.

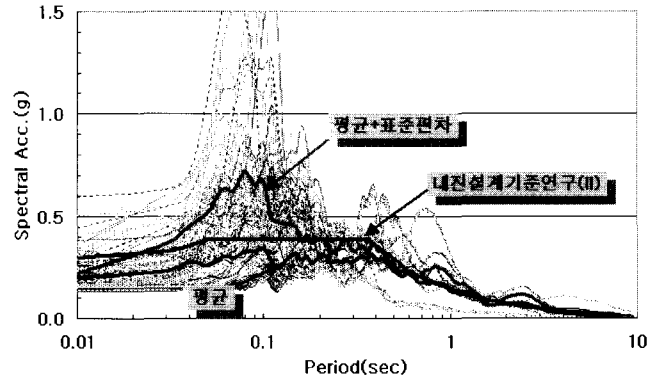
#### 4. 해석결과

본 절에서는 위에서 선정한 해석대상 부지의 전단파속도 주상도와 기반암의 운동수준, 입력지진 및 지반의 동적물성치를 이용하여 등가선형해석을 바탕으로 지진응답해석을 수행하였다. 해석은 등가선형 해석프로그램 SHAKE91을 이용하였다.

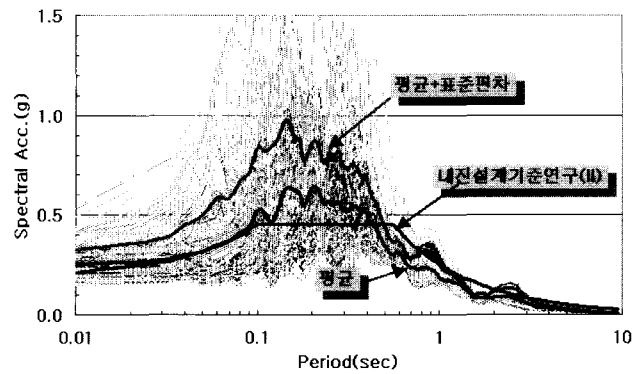
##### 4.1 설계응답스펙트럼

해석결과와 지표면에서 구조물 주기에 따른 설계 응답스

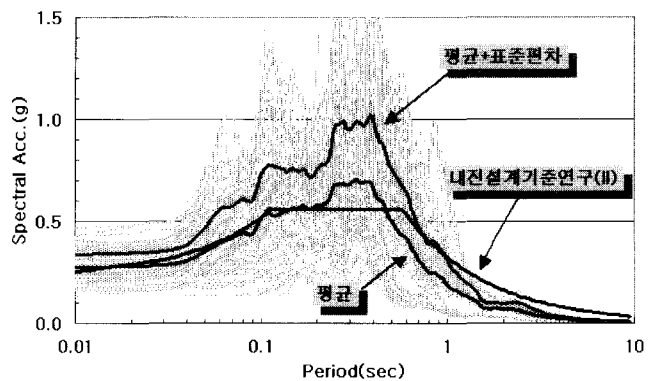
펙트럼을 그림 9에 나타나 있는 국내 내진설계기준과 비교하였다. 148개 지반의 해석에서 얻어진 응답스펙트럼은  $S_B$  지반,  $S_C$  지반과  $S_D$  지반으로 구분하여 내진설계기준연구(II)의 설계응답스펙트럼 값과 해석결과의 평균값 및 평균값 + 표준편차 값을 그림 10에 나타내었다.



(a)  $S_B$  지반



(b)  $S_C$  지반



(c)  $S_D$  지반

그림 10 해석결과 지반 종류별 응답스펙트럼

단주기 증폭계수  $F_u$ 를 계산할 때 식(5)에 나타나 바와 같이 0.1초 이하는 고려하지 않으므로, 주기 0.1초 이하의 결과를 무시하면  $S_B$  지반의 경우 해석에서 얻어진 응답스펙트럼과 내진설계기준과의 차이는 크게 다르지 않음을 볼 수 있다. 이는  $S_B$  지반의 경우 보통암에 해당하는 지반으로, 압반으로 된 지반의 경우 미국의 지반조건과 국내의 지반조건에는 큰 차이가 없기 때문에 해석결과에서도 큰 차이가 없는

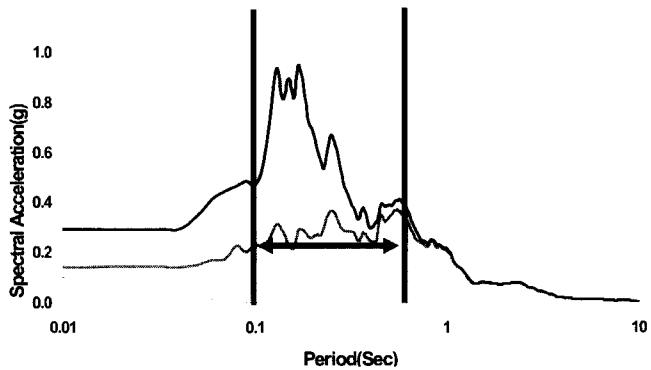
것으로 판단되다.

그러나, S<sub>c</sub> 지반과 S<sub>b</sub> 지반의 응답스펙트럼과 국내 내진설계 기준의 값에 많은 차이가 나타났다. 특히, S<sub>c</sub> 지반과 S<sub>b</sub> 지반의 해석에서 얻은 응답스펙트럼의 경우 단주기 영역에서 응답값의 증폭이 크게 발생하는 반면, 장주기 영역에서는 내진설계기준의 값보다 작은 값을 가진다. S<sub>c</sub> 지반의 경우 주기 0.4초 부근을 기준으로 단주기 영역에서 내진설계기준의 값보다 크게 증폭되는 현상이 발견되고, 장주기 영역에서는 내진설계기준의 값보다 상당히 작아진다. S<sub>b</sub> 지반의 경우에도 주기 0.4초와 0.5초 사이를 기준으로 같은 현상을 관찰할 수 있다.

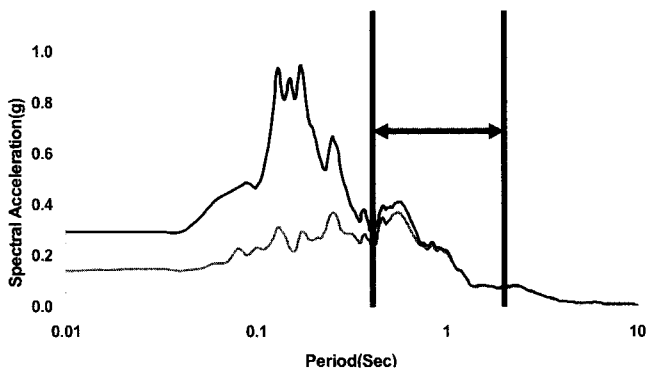
위와 같은 현상은 우리 나라의 S<sub>c</sub> 지반과 S<sub>b</sub> 지반의 경우 기반암이 대부분 30m 이내에 존재하여 미국 서부해안지역의 지반특성과는 많은 차이가 있어 해석결과와 내진설계기준에 많은 차이가 나타난 것으로 판단된다. 따라서, UBC 기준을 그대로 준용하고 있는 국내 내진설계기준에서 S<sub>c</sub> 지반과 S<sub>b</sub> 지반의 경우 응답스펙트럼을 국내 지반의 일반적인 특성에 적합하도록 재산정할 필요가 있는 것으로 판단된다.

#### 4.2 증폭계수(F<sub>a</sub>, F<sub>v</sub>) 산정

지진응답해석 결과를 바탕으로 국내 지반에 적합한 증폭계수 F<sub>a</sub>와 F<sub>v</sub>를 산정하였다. 증폭계수는 동일한 주기에서 기반암 응답스펙트럼에 대한 지표면 응답스펙트럼의 비율(Ratio of Response Spectra, RRS)을 의미하며, 그림 11에는 증폭계수 F<sub>a</sub>와 F<sub>v</sub>를 계산할 때 적분구간을 나타내었고, F<sub>a</sub>와 F<sub>v</sub>를 산정하는 식은 식(5)와 식(6)을 이용하였다.<sup>(8),(9)</sup>



(a) 증폭계수 F<sub>a</sub>의 적분구간



(b) 증폭계수 F<sub>v</sub>의 적분구간

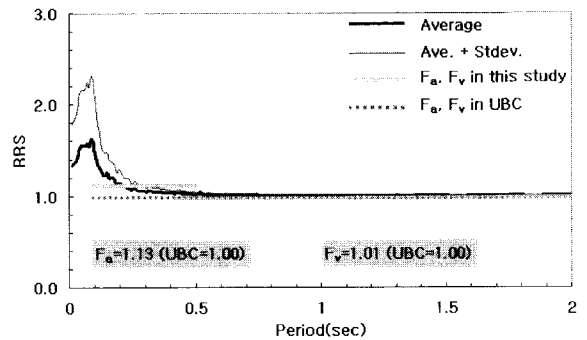
그림 11 증폭계수 적분구간

$$F_a(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rockl}(T)} dT \quad (5)$$

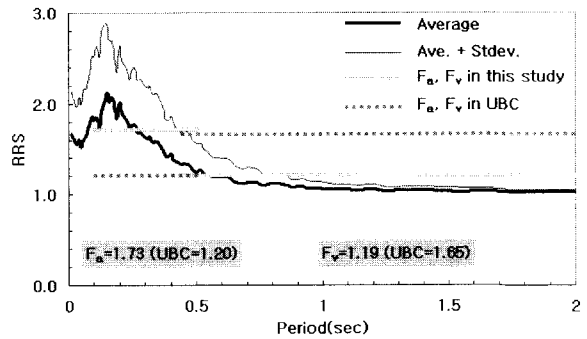
$$F_v(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rockl}(T)} dT \quad (6)$$

여기서, R<sub>soil</sub>/R<sub>rock</sub> = 1.0 으로 가정<sup>(8)</sup>

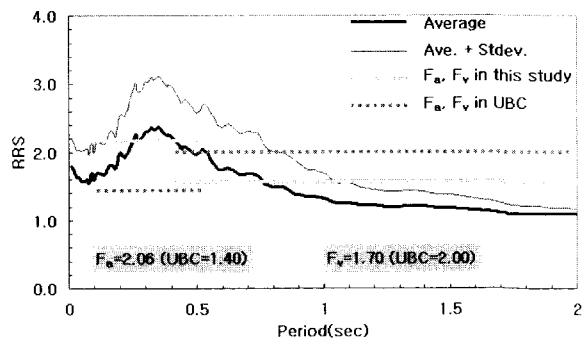
해석에서 얻어진 S<sub>b</sub> 지반, S<sub>c</sub> 지반과 S<sub>b</sub> 지반의 증폭계수는 그림 12에 나타내었고, 지반종류에 따른 증폭계수와 UBC 기준의 값은 표 10에 비교 분석하였다. 이때, 지진응답해석의 경우 기반암 가속도의 크기를 0.154g를 이용하였으므로, 표 5와 표 6의 F<sub>a</sub>와 F<sub>v</sub>의 값은 shaking intensity가 0.10g와 0.20g의 중간값인 0.15g로 환산하여 비교하였다. 또한, UBC 기준의 방법과 같이 적용하기 위하여, F<sub>a</sub>는 주기 0.1초에서 0.5초 사이의 RRS 평균값으로 비교를 하였고, F<sub>v</sub>는 주기 0.4초에서 2.0초 사이의 RRS 평균값 + 표준편차의 값으로 비교하였다.<sup>(8),(9)</sup>



(a) Soil Type S<sub>b</sub>



(b) Soil Type S<sub>c</sub>



(c) Soil Type S<sub>b</sub>

그림 12 해석결과에서 얻어진 증폭계수(F<sub>a</sub>, F<sub>v</sub>)



표 10과 그림 12에 나타난 결과를 살펴보면, 국내의 S<sub>c</sub> 지반과 S<sub>D</sub> 지반 모두 단주기 영역에서 증폭이 크게 발생하는 것을 볼 수 있고, 0.5초 이상의 장주기 영역에서는 응답스펙트럼의 증폭이 거의 발생하지 않음을 볼 수 있다. 이는 국내 S<sub>c</sub> 지반과 S<sub>D</sub> 지반의 경우 장주기 증폭보다 단주기 증폭이 더 많이 발생함을 의미한다. 국내 지반에서 단주기 영역에서 크게 증폭현상이 나타나는 이유는 표 2와 표 4에 나타난바와 같이 국내 지반의 경우 기반암이 얇은 깊이에 존재하여 지반의 고유주기가 단주기 영역에 해당하기 때문으로 판단된다. S<sub>B</sub> 지반의 경우 F<sub>a</sub> 값과 F<sub>v</sub> 값이 1.0 근처의 값으로 나타나 UBC 기준의 값과 큰 차이는 없는 것으로 판단된다. 이는 S<sub>B</sub> 지반의 경우 암반 지반에 해당하고 암반 지반의 경우 국내 지반특성과 미국 서부해안의 지반특성에 큰 차이가 없기 때문으로 분석할 수 있다.

표 10 해석대상부지의 F<sub>a</sub>, F<sub>v</sub> 및 UBC 기준과의 비교  
(Shaking Intensity = 0.154g)

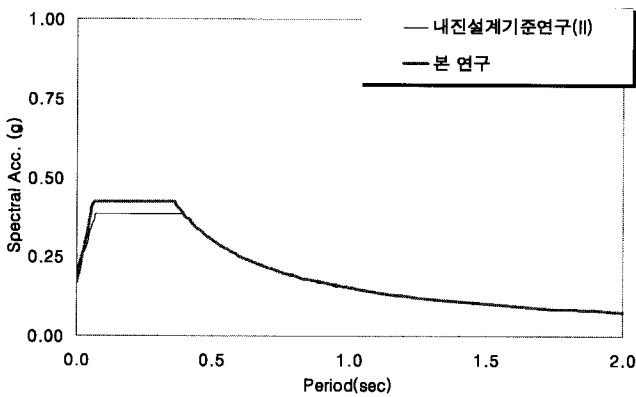
지반종류	F <sub>a</sub>		F <sub>v</sub>	
	본 연구	UBC	본 연구	UBC
S <sub>B</sub>	1.13	1.00	1.01	1.00
S <sub>C</sub>	1.73	1.20	1.19	1.65
S <sub>D</sub>	2.06	1.50	1.57	1.20

따라서, 암반지반을 제외할 때 국내 지반특성은 미국 지반보다 단주기 영역에서 응답스펙트럼의 증폭이 상대적으로 크게 발생하고, 장주기 영역에서는 작게 발생함을 알 수 있다. 이는 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼은 지반특성에 적합하도록 개선할 필요성이 있다.

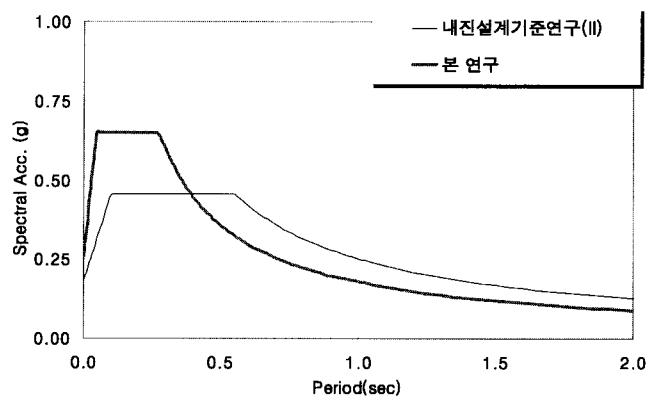
### 4.3 국내 지반특성에 적합한 설계응답스펙트럼

표 10과 그림 12에 나타난 바와 같이, 국내 지반에 적합한 증폭계수는 UBC 기준에서 제시하고 있는 값과 많은 차이가 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내 지반에 적합한 새로운 증폭계수를 이용하여 설계응답스펙트럼 작성 방법을 제안한다. 이 경우 기존의 UBC 방법과 마찬가지로 설계응답스펙트럼 작성에 단주기 영역과 장주기 영역의 두 증폭계수를 이용하여 작성하였다. 표 10의 F<sub>a</sub> 값과 F<sub>v</sub> 값을 이용하여 S<sub>B</sub> 지반, S<sub>C</sub> 지반, S<sub>D</sub> 지반의 설계응답스펙트럼을 작성한 결과는 각각 그림 13에 나타내었다. 이 경우 설계응답스펙트럼의 작성법은 그림 9의 국내 내진설계기준을 따랐다.

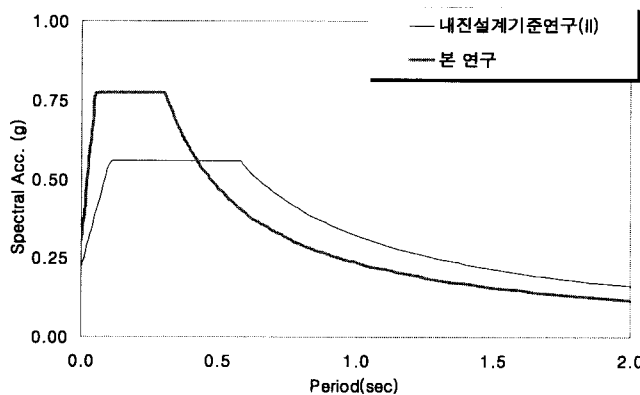
그림 13의 결과를 살펴보면, 현재 국내의 S<sub>c</sub> 지반, S<sub>D</sub> 지반에 대한 내진설계기준의 설계응답스펙트럼의 경우 지반 특성을 제대로 나타내지 못하고 있음을 재차 확인할 수 있다. 특히 S<sub>c</sub> 및 S<sub>D</sub> 지반 모두 주기 0.40초 근처를 중심으로 단주기 영역에서는 현재 기준이 과소설계의 위험성이 있어 국내



(a) S<sub>B</sub> 지반



(b) S<sub>C</sub> 지반



(c) S<sub>D</sub>지반

그림 13 국내 지반특성에 적합한 설계응답스펙트럼의 재산정

에서 지진이 발생할 경우 저층 구조물이 취약할 수 있음을 의미하고, 장주기를 가지는 고층건물의 경우 과다설계의 원인이 될 수 있다.  $S_b$  지반의 경우 국내 지반조건과 미국의 지반조건 모두 암반지반 조건으로 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

설계응답스펙트럼을 정확하게 작성하기 위하여는 선행되는 지반분류 체계를 먼저 개선해야 한다. 내진설계기준연구 II의 경우 상부 토층 30m 평균 전단파속도를 이용하여 지반을 분류하고 있으나, 이는 국내 지반의 경우 대부분 30m 보다 훨씬 얇은 곳에 기반암이 존재하여 국내 지반특성에는 적합하지 않는 기준으로 판단된다. 본 논문에서는 지반분류 방법의 개선방안에 대하여 자세하게 언급을 하지는 않았지만, 향후 지반분류 방법의 개선에 대하여도 많은 전문가들의 의견 수렴이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 국내 지반특성을 고려한 설계지반운동 결정방법에 대한 연구를 통하여 향후 국내 내진설계기준을 개정할 때 이를 적절하게 반영해야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 148개 지반에 대한 지진응답해석을 수행하여 현재 국내 내진설계기준(또는 UBC 기준)의 설계응답스펙트럼과 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 국내 지반과 미국 서부해안지역의 지반은 기반암 깊이와 고유주기가 매우 다름을 확인하였다. 미국 서부해안지역 지반조건에 적합하도록 작성된 미국 UBC 기준을 토대로 제정된 국내 내진설계기준의 설계지반운동결정 방법은 국내 지반조건에 적합하도록 개선되어야 한다.
- (2) 지반응답해석결과 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼을 결정하기 위한 지진계수(증폭계수)는 국내 지반특성과는 매우 다름을 확인하였다. 특히, 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 지진계수는 단주기 영역 증폭을 과소평가하고 있으며, 장주기 영역 증폭은 과대평가하고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 증폭계수의 산정에 절대적으로 영향을 미치는 요소가 지반분류 방법임을 고려하면, 미국 서부해안지역 지반조건과 국내 지반조건에 많은 차이가 있으므로 국내 지반의 지반분류 방법의 개선이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업과제(KRF-2002-041-D00511)의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부, 내진설계 기준연구 (II), 1997.
2. BSSC, 1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Provisions, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.
3. BSSC, 1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Commentary, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.
4. 건설교통부, "표면파기법을 이용한 사질토 지반 개량효과 평가시스템 개발", 1998.
5. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B.(1972), "SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites," Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
6. 김동수, 추연옥, "공진주 시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성", 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제5호, 2001.
7. <http://peer.berkeley.edu>
8. Dobry, R. and Martin G. "Development of Site-Dependent Ratio of Elastic Response Spectra(RRS)," *Proceeding of the Workshop on Earthquake Site Response and Seismic Code Provisions*, 1999.
9. Borchardt, R. D., "Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design(Methodology and Justification)," *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 4, 1994.
10. Bardet, J.P., Nielsen, E., Villacorta, R., 1998. ROSRINE data dissemination. <http://geoinfo.usc.edu/rosrine>. Accessed 2001. 6. 12.