

국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (I) - 국내 내진설계기준의 문제점 분석

Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (I) - Problem Statements of the Current Seismic Design Code

윤종구* 김동수** 방은석***
Yoon, Jong-Ku Kim, Dong-Soo Bang, Eun-Seok

국문요약

본 논문에서는 국내 162개 지반에 대한 전단파속도 주상도, 기반암 깊이 및 지반의 동적변형특성을 획득하여 등가선형해석을 수행한 후 미국 서부해안지역의 지반 특성과 비교·검토하였다. 검토 결과 국내의 일반적인 특성을 가지는 지반과 미국 서부해안지역의 지반은 기반암 깊이와 고유주기가 매우 다름을 확인하였다. 지진응답 해석 결과 단주기 증폭계수 F_a 의 경우 1997 UBC 기준의 값보다 크게 산정되었고, 장주기 증폭계수 F_v 는 작게 나타나 국내 지반특성에 적합한 증폭계수는 현재 국내 내진설계기준 값과는 매우 다른 경향을 보였다. 따라서, 증폭계수를 재산정하고 설계응답스펙트럼을 개선해야 할 필요성을 확인하였다. 본 논문에서는 현재 이용되고 있는 내진설계기준과 국내 지반특성과의 차이점 파악에 중점을 두었고, 개선방법에 대한 내용은 동반논문(Ⅱ 지반분류 개선방법, Ⅲ 설계응답스펙트럼 개선방법)에서 심도있게 논의하였다.

주요어 : 지반분류, 응답스펙트럼, 지진응답해석, 지반의 고유주기, 증폭계수, 지반조건, 기반암 깊이

ABSTRACT

Site response analyses were performed based on equivalent linear technique using the shear wave velocity profiles of 162 sites collected around the Korean Peninsula. The site characteristics, particularly the shear wave velocities and the depth to bedrock, are compared to those in the western United States. The site coefficients of short period (F_a) and the long period (F_v) obtained from this study were significantly different compared to 1997 Uniform Building Code (1997 UBC). F_a underestimated the motion in short period ranges and F_v overestimated the motion in mid period ranges in Korean seismic guideline. It is found that the existing Korean seismic design guideline is required to be modified considering geological site conditions in Korea for the reliable estimation of site amplification. Problems of the current seismic design code were discussed in this paper and the development of site classification method and modification of desing response spectra were discussed in the companion papers(Ⅱ-Development of Site Classification System and Ⅲ-Modification of Desing Response Spectra).

Key words : site classification, response spectrum, site response analysis, site period, site coefficient, local site condition, bedrock depth

1. 서 론

국내 내진설계기준을 이용할 경우 지반분류 방법이 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있고, 부지 고유의 지진응답해석 결과와 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼을 비교할 경우 단주기와 장주기 영역에서 많은 차이를 보이고 있다. 이는, 우리 나라는 큰 규모의 지진이 자주 발생하지 않는 중약진 지역이고, 내진설계기준 제정을 위한 실지진 기록이 부족하여 지반분류 및 설계응답스펙트럼 작성 방법의 경우 대부분 미국의 1997 National Earthquake Hazards Reduction Program (1997 NEHRP) 및 1997 Uniform Building Code (1997 UBC) 기준을 준용하고 있기 때문이다.⁽¹⁾⁽³⁾

현재 이용되고 있는 미국 기준의 경우 기반암의 깊이가

가 깊은 미국 서부해안지역의 지반에 적합하도록 작성된 기준이다.⁽⁴⁾ 미국의 내진설계기준에서 상부 30m 토층의 평균 전단파속도(V_{S30})를 이용하는 이유는 이전 기준의 서술식 지반분류 방법의 모호함을 개선하고, 기반암의 깊이가 상당히 깊어 기반암 깊이까지 설계에 반영할 수 없을 경우 지진사 가장 큰 영향을 미치는 상부 30m 토층의 물성으로 설계에 이용하기 위함이었다.⁽⁵⁾ 그러나, 국내 일반적인 지반의 경우 기반암의 깊이가 30m 이내에 존재하는 경우가 대부분이기 때문에 V_{S30} 을 이용하여 지반을 분류할 경우 토층과 암반의 물성을 같이 반영할 수 밖에 없다. 즉, 기반암의 깊이가 깊은 지역에서 설계의 효율성을 위하여 상부 30m의 평균 지반물성을 이용하려는 취지가 기반암의 깊이가 얕은 지역의 경우 불합리한 요소가 반영될 수 있는 개연성이 있다. 따라서, 기반암이 대부분 30m 이내에 존재하고 장주기 영역 보다는 단주기 영역에서 스펙트럴 가속도의 증폭이 크게 나타나는 국내의 지반특성을 고려하면, 1997 UBC 기준을 그대로 사용하고 있는 국내 내진설계기준의 지반분류 방법 및 설계

* 정회원·한국유지관리(주) 지반설계사업부 이사(대표저자:hawaiiyoony@kmctech.co.kr)
** 정회원·한국과학기술원 건설및환경공학과 교수
*** 정회원·한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정
본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2006. 1. 6 / 심사종료일 : 2006. 3. 21)

응답스펙트럼 작성 방법은 개선의 여지가 있고 판단된다.

본 논문에서는 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 작성 방법을 개선하기 위하여 162개 지반에 대한 지진응답해석을 수행하여, 미국 서부해안지역의 지반특성과 비교하였다. 해석결과를 바탕으로 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 단주기 및 장주기 증폭계수와 비교 분석하여 국내 일반적인 지반특성에 적합한 증폭계수를 산정하였다. 또한, 국내 내진설계기준의 근간이된 미국 기준에서 제시하고 있는 증폭계수와 비교하여 국내 지반특성과 현재 내진설계기준의 차이점에 대하여 논의하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 국내 지반특성에 적합한 지반분류 개선방법에 대하여는 동반논문(II-지반분류 개선방법)에서 상세하게 논의하였고, 설계응답스펙트럼 개선방법 및 설계응답스펙트럼 산정을 위한 증폭계수 산정방법에 대하여는 동반논문(III-설계응답스펙트럼 개선방법)에 논의하였다.

2. 해석대상부지 및 미국 서부해안지역 지반조건 비교

2.1 해석대상부지

해석대상지반의 지반조사 자료는 전국의 도시지역을 중심으로 국내 일반적인 지반의 특성을 가지는 풍화토와 풍화암이 발달된 지역 및 퇴적토가 발달된 지역에서 자료를 획득하거나 직접 시험을 수행하여 얻었다. 또한, 연약한 지반의 경우 주로 해안지역의 해성퇴적층이 깊게 발달된 곳이나 하천 유역의 퇴적지반이 깊게 발달된 지반이 대부분이었다. 그림 1에는 162개의 해석대상지반 위치를 지도상에 표시하였고, 해석대상부지에 대한 간략한 설명은 표 1에 나타내었다. 162개 지반을 건설교통부 상위개념 기준인 내진설계기준연구(II)의 방법으로 지반을 분류하였을 경우 S_B 지반에 해당하는 지반이 16개, S_C 지반은 76개, S_D 지반은 60개 그리고 S_E 지반은 10개로 분류되었다. 각 지반 종류별 깊이에 따른 전단파속도 추상도는 그림 2에 나타내었다. 표 2에는 해석지반의 지반종류별 기반암 깊이, V_{S30} 및 지반의 고유주기를 정리하였고, V_{S30} 및 지반의 고유주기 T_G는 각각 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

표 1 해석대상부지

현장 종류	위치	부지개수	지반조사 방법
지하철 공사현장	3, 12, 19	8	SPT
지하철 공사현장	3	8	D
APT 공사현장	1, 3, 5, 6, 13, 15, 16, 19	34	SPT
장대 교량 부지	7, 14	11	D, S, SPS
항만 건설 현장	2, 17, 19	23	SPS
일반도시지역	9	18	S, D, C
	21	29	S, D, C
철도 건설 현장	11, 18	17	D, SPS
고속도로 건설 현장	8, 10	5	D
일반국도 건설 현장	4, 7, 8, 20	9	D
계		162	

* 숫자는 그림 1의 지도상에 나타난 숫자

** STP 표준관입시험, C - 크로스홀 기법, D - 다운홀 기법, S - 표면파 기법(SASW test), SPS SPS logging 기법

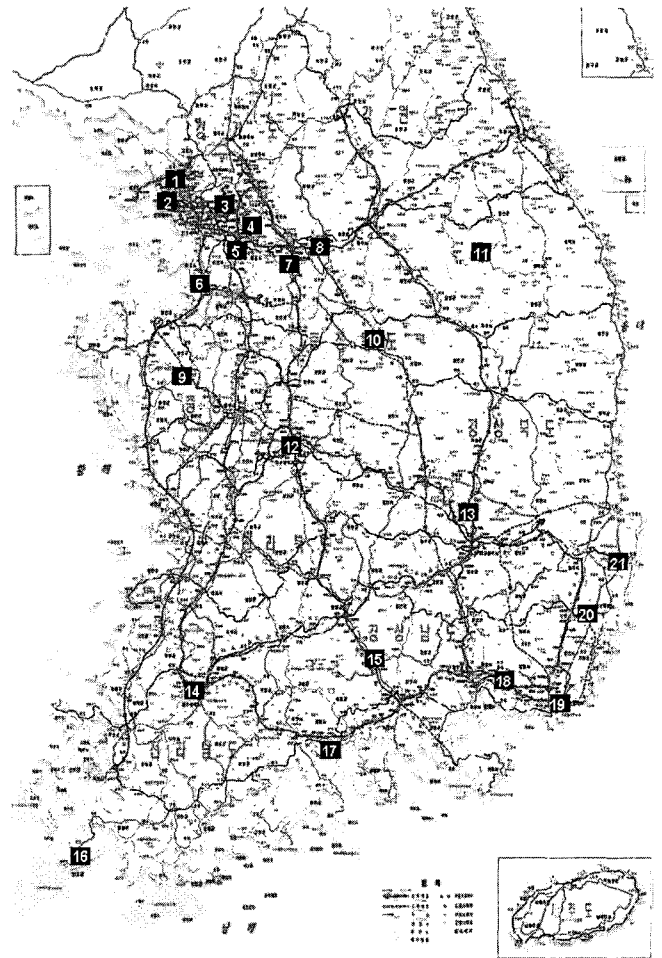


그림 1 해석대상지반 위치

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

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{Si}} \quad (2)$$

여기서, d_i = 심도 30m까지 i 번째 토층의 두께(m)

D_i = 기반암 깊이까지 i 번째 토층의 두께(m)

V_{Si} = i 번째 토층의 전단파속도 (m/sec)

표 2를 살펴보면 기반암의 위치는 S_B 지반의 경우 심도 0.0m에서 14.0m, S_C 지반의 경우 심도 5.3m에서 50.0m, S_D 지반의 경우 심도 9.25m에서 47.0m 및 S_E 지반의 경우 심도 29.0m에서 56.0m에 위치하였다. 각 지반별 기반암이 위치한 평균 깊이는 S_B 지반의 경우 심도 6m 정도이고, S_C 지반의 경우 심도 18.3m, S_D 지반의 경우 심도 23.5m로 상부 토층 30m 평균 전단파속도를 이용하여 지반을 분류할 경우 대부분의 지반에서 암반층의 물성이 지반분류에 반영되고 있다. 그러나, S_E 지반의 경우 기반암의 평균 깊이가 심도 38.5m로 상부 30m의 평균 전단파속도를 이용할 경우 기반암의 물성은 반영되지 않았다.

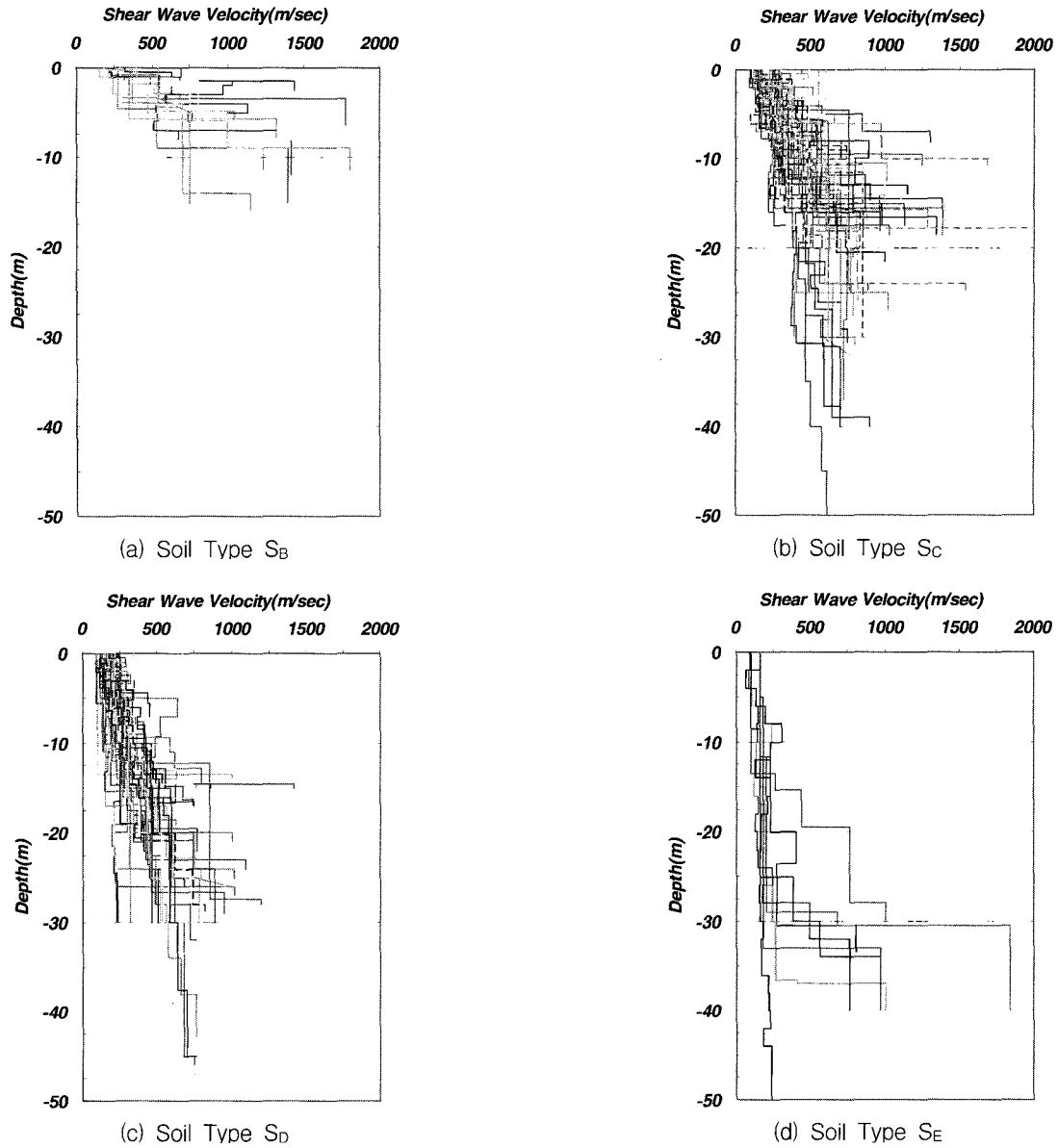


그림 2 지반종류별 깊이에 따른 전단파속도 주상도

표 2 해석지반의 지반종류별 평균 기반암 깊이, 전단파속도 및 지반의 고유주기

	S _B			S _C			S _D			S _E			
	최소	최대	평균	최소	최대	평균	최소	최대	평균	최소	최대	평균	
기반암 깊이 (m)	0.0	14.0	6.0	5.3	50.0	18.3	9.25	47.0	23.5	28.0	56.0	38.5	
V _{s30} (m/sec)	761.0	1244.8	961.0	373.8	729.4	488.8	191.8	369.6	312.7	133.7	179.94	165.7	
주기 (sec)	국내	0.00	0.10	0.06	0.07	0.42	0.22	0.24	0.67	0.37	0.68	1.35	0.88
	WUS*				0.30 - 0.80		약 0.50	0.40 - 1.90		약 1.20			

* ROSRINE (Resolution Of Site Response Issues from the Northridge Earthquake) 프로젝트 지반 데이터
<http://geoinfo.usc.edu/rosrine/>, WUS-the Western United States.

S_E 지반을 제외할 경우 해석대상지반의 대부분은 상부 토층에 매립토, 충적토, 자갈이 많은 퇴적층이 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 깊게 발달하여 기반암

의 깊이가 심도 50m 이하에 존재하는 경우도 있었다. 특히, S_E 지반의 경우 대부분 해성퇴적층이 깊이 발달한 지반이거나 하천 유역의 퇴적층이 깊게 발달된 지반이었다.

지진응답해석에서 가장 중요한 입력물성치는 깊이에 따른 지반의 전단파속도 및 기반암의 위치이다. 지반의 전단파속도는 수행된 지반조사 기법에 많은 영향을 받으므로 신뢰성 있는 지반조사 기법으로 얻어진 전단파속도

를 이용하는 것이 중요하다. 해석대상부지 162개 지반 중 다운홀, 크로스홀, SASW 및 SPS logging 시험 등의 현장 탄성파기법으로부터 얻어진 자료는 120개 지반이었고, 42개 지반의 경우 SPT-N값을 이용하여 경험적 상관식으로 전단파속도를 추정된 지반이었다.

2.2 미국 서부해안지역의 지반조건

미국 서부해안지역 ROSRINE 프로젝트 현장지반의 전단파속도 주상도는 그림 3에 나타나 있다.^{(6),(7)} 그림 3의 경우 지반분류 없이 통합하여 나타난 그림이다. 국내 지반의 평균 전단파속도 주상도와 ROSRINE 프로젝트 현장지반을 비교해보면, 대부분의 국내 지반의 경우 깊이 30m 이내에 기반암이 존재하고 깊은 깊이의 경우 50m 내외이지만, 미국 서부해안지역 지반의 경우 깊이 100m ~ 300m 정도에 존재하여 국내 일반적인 지반특성과는 전혀 다른 특성을 보인다.

미국 UBC 기준의 경우 기반암이 지하 100m~300m 정도에 존재하는 미국 서부해안지역에서 기반암 깊이까지 지반조사를 일반적으로 할 수 없기 때문에 지진시 지반운동과 상관성이 큰 상부 토층 30m의 평균 물성치를 이용하여 내진설계를 하는 개념이다. 따라서, 기반암이 대부분 심도 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.

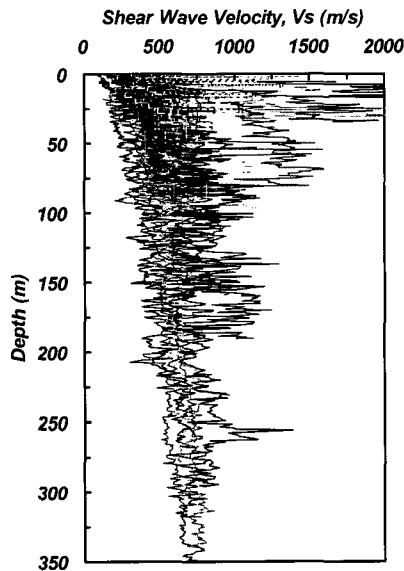


그림 3 ROSRINE 현장 지반의 전단파속도 주상도^{(6),(7)}

국내 지반과 ROSRINE 프로젝트 현장지반의 차이는 지반의 고유주기를 비교해 보면 더욱 명확해진다. 그림 4와 표 2에는 국내 해석대상지반의 고유주기와 ROSRINE 현장지반의 지반의 고유주기를 비교하였다.^{(6),(7)} 국내 S_c 지반의 경우 고유주기의 평균값은 0.22초 정도이고, S_D 지반의 경우 0.37초 정도이다. 그러나, 미국 서부해안지역

(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.

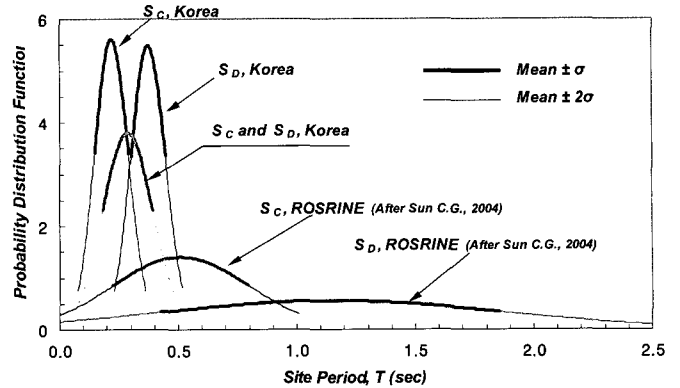


그림 4 국내지반 해석대상지반과 ROSRINE 현장 지반의 고유주기 비교

이와 같이 국내 지반과 미국 서부해안지역 지반의 고유주기가 큰 차이를 보이는 것은 식 (2)에 나타난 바와 같이 지반의 고유주기가 기반암 깊이에 대한 함수이기 때문이다. 그림 4의 결과를 살펴보면 국내 지반의 고유주기 범위는 ROSRINE 프로젝트 현장지반의 고유주기 범위보다 단주기 영역에 있고 매우 좁게 분포한다. 이는 국내 지반의 경우 기반암 깊이가 깊지 않고, 기반암 위치의 분포 범위가 좁기 때문에 고유주기의 분포도 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 검토 및 개선이 필요한 것으로 판단된다.

3. 입력자료의 선정

1차원 지진응답해석을 위한 입력 가속도의 선정은 내진설계기준연구(II)에 제시되어 있는 방법을 따라 0.110g, 0.154g 및 0.220g로 각각 결정하였다. 이는 지진구역 I구역 1등급 붕괴방지수준의 재현주기 500년과 1,000년 그리고 2,400년에 해당하는 수준이다.⁽¹⁾

우리나라의 경우 큰 규모의 지진이 자주 발생하지 않는 중약진 지역이고, 내진설계기준 제정을 위한 실지진 기록이 부족하여 지진응답해석을 수행할 경우 주로 외국에서 측정된 실지진 기록을 이용하거나 인공지진을 이용해야 한다. 본 연구에서는 이러한 사정을 고려하여 PEER (Pacific earthquake engineering research) 센터의 입력지진 선택 권고안을 바탕으로 입력 지진운동을 결정하였다.⁽⁸⁾ 또한, 입력지진파를 선정하는데 있어 다양한 주파수 성분을 가지는 지진파를 선정하는데 주안점을 두었다. 이를 위하여 단주기 특성을 보이는 암반계측 지진파와 장

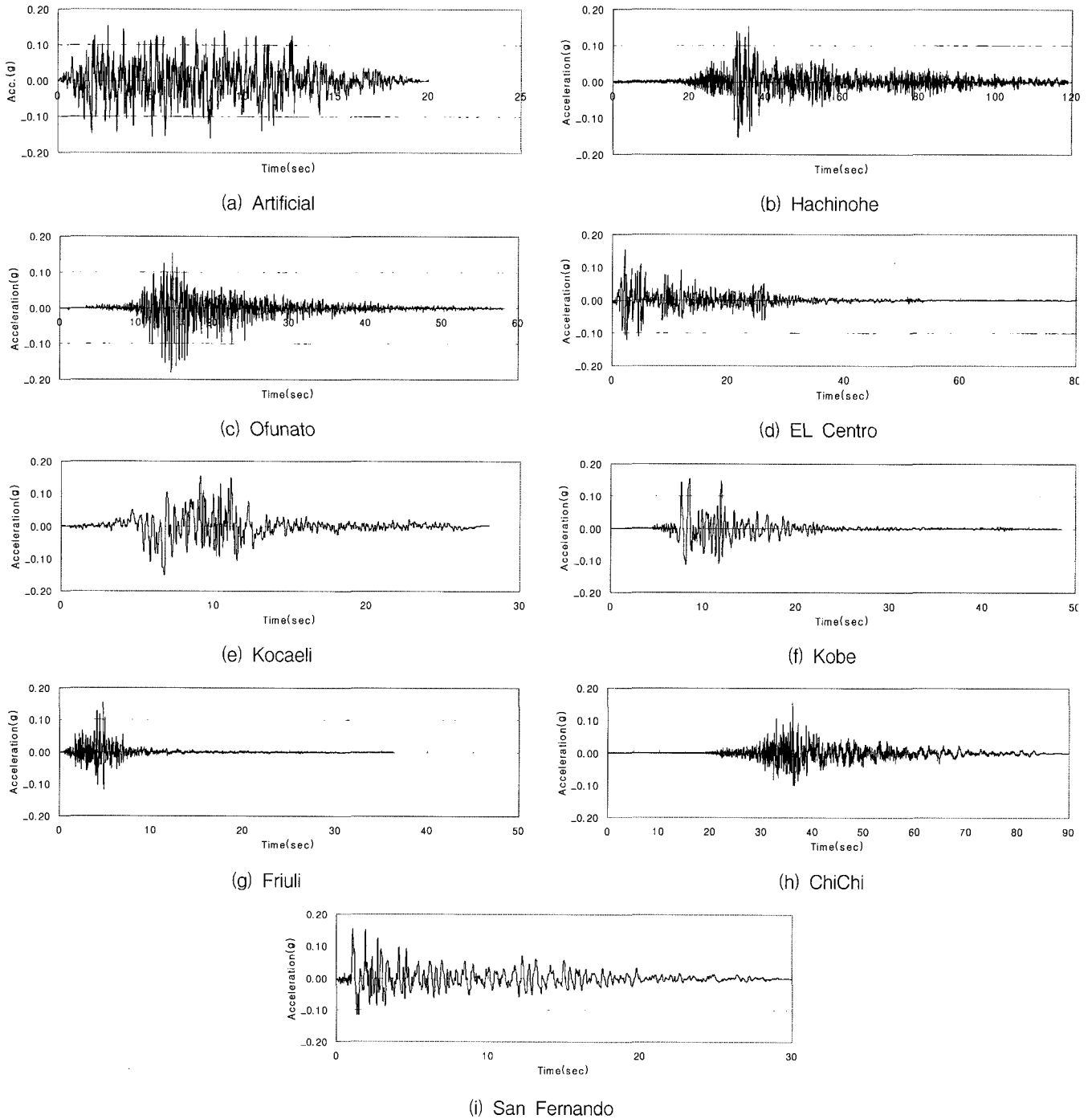


그림 5 해석에 이용된 지진파의 시간이력곡선

표 3 지진파의 제원

Earthquake	Magnitude	Recorded Date	Recorded Location	Site Category
인공지진				S _B
Hachinohe	7.9	05/16/68	Tokachioki, Japan	S _C
Ofunato	7.4	12/06/78	Miyagikenoki, Japan	S _D
El Centro	5.2	15/10/79	California, USA	S _C
Kocaeli	7.4	17/08/99	Kocaeli, Turkey	S _A
Kobe	6.9	16/01/95	Kobe, Japan	S _B
Friuli	6.5	16/05/76	Friuli, Italy	S _B
ChiChi	7.6	20/09/99	ChiChi, Taiwan	S _A
San Fernando	6.6	09/02/71	California, USA	S _A

주기 특성을 보이는 토층계측 지진파를 선정하였다. 해석에 이용된 지진기록의 최대 가속도는 0.110g, 0.154g 및 0.220g로 수정하여 이용하였으며, 해석을 위한 입력 위치는 암반노두로 통일하였다. 각 지진파의 시간이력곡선 및 제원은 그림 5 및 표 3에 각각 나타내었다.

본 해석에서는 1차원 지진응답해석에 널리 쓰이는 등가선형해석 프로그램인 SHAKE91을 이용하였다.^{(9),(10)} SHAKE91 프로그램의 해석을 위하여 지반응답해석에 필요한 지반의 동적 물성치인 변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선은 현장 지반에서 시료를 채취하여 실내실험을 하였을 경우 실험값을 직접 이용하였고, 실험값이 없을 경우 문헌의 자료를 이용하여 결정하였다.⁽¹¹⁾ 사용된 전단변형률의 크기

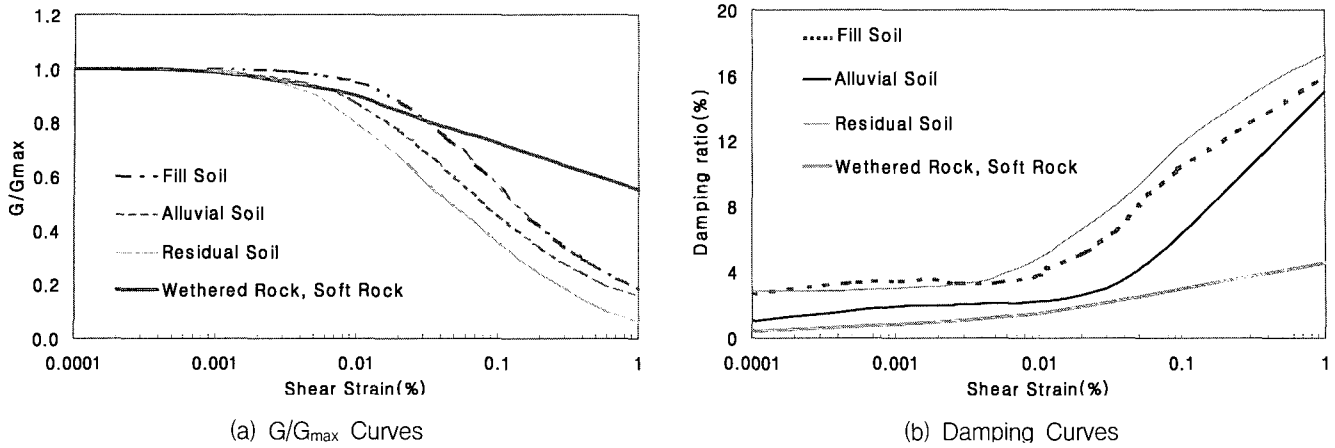


그림 6 해석에 사용된 지반의 비선형 동적물성치

에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선은 그림 6에 나타내었다.

4. 지진응답해석 결과

본 연구에서는 국내 지반 162개의 해석대상부지, 9개의 지진파 그리고 세 가지의 재현주기에 따른 암반노두의 가속도 등 총 4,374개의 SHAKE91 해석결과를 분석하였다. 본 장에서는 1차원 등가선형 지진응답해석을 수행하여 해석에서 얻어진 S_b , S_c , S_D 그리고 S_E 지반의 응답스펙트럼과 내진설계기준에서 제시하고 있는 표준 설계응답스펙트럼과 비교하였으며, 1997 UBC에서 제시하고 있는 증폭계수(F_a , F_v)의 값과 비교하였다. 또한, 해석결과를 바탕으로 증폭계수를 산정하여 새로운 응답스펙트럼을 작성하였다. 세 가지 재현주기에 대하여 지진응답해석을 수행하였으나, 본 논문에서는 재현주기 1,000년에 해당하는 해석결과를 바탕으로 설명한다.

4.1 증폭계수

국내 내진설계기준의 설계지진력 산정방법의 근간인 1994 NEHRP 등의 미국 기준에서 단주기 영역 증폭을 통제하는 증폭계수 F_a 와 장주기 영역 증폭을 통제하는 증폭계수 F_v 를 이용하여 설계응답스펙트럼을 작성하고 있고, 각각 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 계산되었다.⁽¹²⁾

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

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

여기서, R_{rock} 와 R_{soil} 의 값은 각각 진원(fault)에서 암반노두와 지표면까지의 거리(hypocentral distance)를 의미하고, 본 연구에서는 R_{soil}/R_{rock} 의 경우 진앙에서 거리가 먼 경우 1.0으로 가정하여 계산하였다. RS_{soil} 은 구조물의 주

기 T에서 지표면의 스펙트럴 가속도 값이고, RS_{rock} 은 암반노두의 스펙트럴 가속도 값이다. 즉, RS_{soil}/RS_{rock} 은 주어진 주기 T에서 기반암과 지표면의 스펙트럴가속도비로서 RRS (ratio of response spectra)로 나타낸다. 따라서, F_a 는 주기 0.1초에서 0.5초 사이에서 지표면과 암반노두의 스펙트럴가속도비(RRS)의 평균값을 의미하고, F_v 는 주기 0.4초에서 2.0초 사이의 RRS의 평균값을 의미한다. 또한, 본 논문에서는 감쇠비 5%에 해당하는 응답스펙트럼에 대하여 기술하였다.

1994 NEHRP의 증폭계수 F_v 는 식 (4)에서 RRS의 평균값을 이용하지 않고, 평균값(average) + 표준편차(standard deviation, σ)의 값을 이용하여 산정된 값이다. 이는 장주기 영역에서 RRS 값의 산란정도가 매우 심하고 일반적으로 장주기 영역에 해당하는 구조물의 경우 중요한 구조물들이 많기 때문에 장주기 영역의 스펙트럴 가속도의 증폭을 보수적인 관점을 견지하였기 때문이다. Dobry 등 (1999)은 위와 같은 사항을 설계기준에 반영하기 위하여 평균값 보다 평균값 + 표준편차를 이용하는 것이 더 적절한 것으로 판단하여 F_v 를 계산하였고, 이를 현재 이용되고 있는 미국 내진설계기준에 적용하고 있다.⁽¹²⁾

4.2 스펙트럴 가속도 및 설계응답스펙트럼

그림 7에는 재현주기 1,000년 지진에 대하여 해석결과의 평균값 및 평균값 + 표준편차 값과 내진설계기준의 S_b , S_c , S_D 그리고 S_E 지반의 표준 설계응답스펙트럼 값을 비교하여 나타내었다. 단주기 증폭계수 F_a 를 계산할 때 식 (3)에 나타나 바와 같이 0.1초 이하는 고려하지 않으므로, 주기 0.1초 이하의 결과를 무시하면 그림 7(a)의 S_b 지반은 스펙트럴 가속도의 평균값과 내진설계기준과의 차이는 크게 다르지 않음을 볼 수 있다. 이는 S_b 지반의 경우 보통암에 해당하는 지반으로, 암반으로 된 지반의 경우 미국 서부해안지역의 지반조건과 국내의 지반조건에는 큰 차이가 없기 때문인 것으로 판단된다.

그러나, 그림 7(b)와 그림 7(c)의 S_c 와 S_D 지반의 스

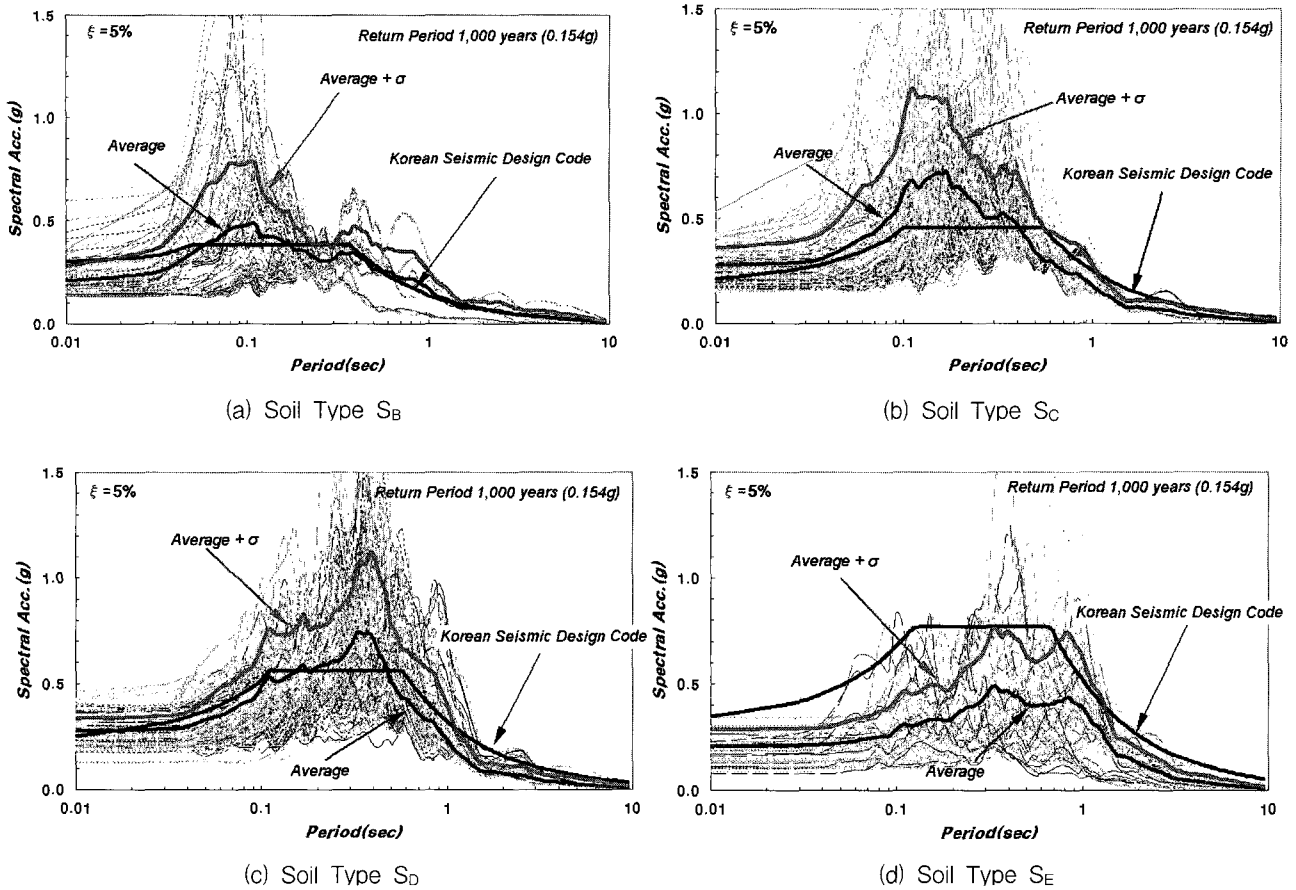


그림 7 재현주기 1,000년에 대한 지반 종류별 응답스펙트럼 (지반분류 기준 - V_{S30})

표 4 단주기 증폭계수 F_a (지반분류 기준 V_{S30})

Site Category	0.110g			0.154g			0.220g		
	This Study		NEHRP 1997	This Study		NEHRP 1997	This Study		NEHRP 1997
	F _a	σ*		F _a	σ		F _a	σ	
S _B	1.09	0.077	1.00	1.10	0.084	1.00	1.11	0.095	1.00
S _C	1.69	0.345	1.20	1.72	0.351	1.20	1.77	0.390	1.20
S _D	2.09	0.438	1.58	2.05	0.448	1.50	1.98	0.499	1.36
S _E	1.52	0.579	2.42	1.37	0.573	2.07	1.21	0.559	1.54

*σ : 표준편차

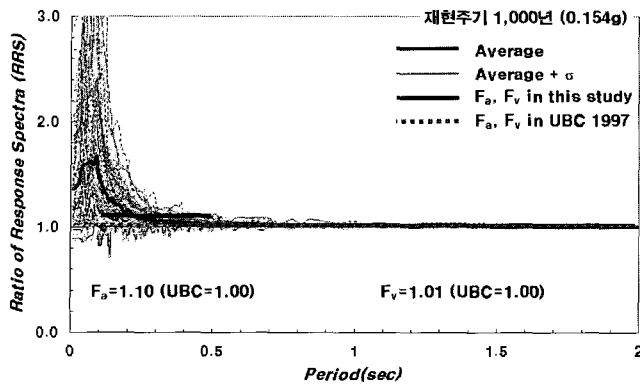
표 5 장주기 증폭계수 F_v (지반분류 기준 V_{S30})

Site Category	0.110g				0.154g				0.220g			
	This Study			NEHRP 1997	This Study			NEHRP 1997	This Study			NEHRP 1997
	Ave.*	σ	F _v **		Ave.	σ	F _v		Ave.	σ	F _v	
S _B	1.01	0.006	1.01	1.00	1.01	0.006	1.01	1.00	1.01	0.007	1.02	1.00
S _C	1.09	0.085	1.17	1.69	1.10	0.096	1.19	1.65	1.12	0.122	1.24	1.58
S _D	1.34	0.273	1.61	2.36	1.37	0.277	1.64	2.14	1.40	0.269	1.67	1.92
S _E	2.19	0.351	2.54	3.47	2.12	0.375	2.50	3.34	2.02	0.443	2.46	3.14

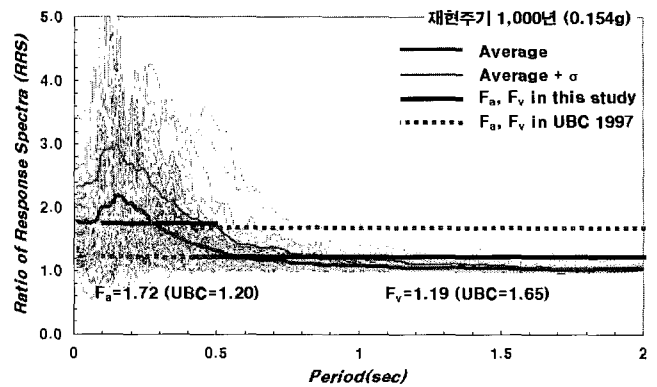
*Ave. = 평균, ** F_v의 경우 RRS + σ이용

펙트럴 가속도의 평균값과 국내 기준의 값에 많은 차이가 나타났고, 단주기 영역에서 응답값의 증폭이 크게 발생하는 반면, 장주기 영역에서는 내진설계기준의 값보다 작은 값을 가진다. S_C 지반의 경우 주기 0.4초 부근을 기준으

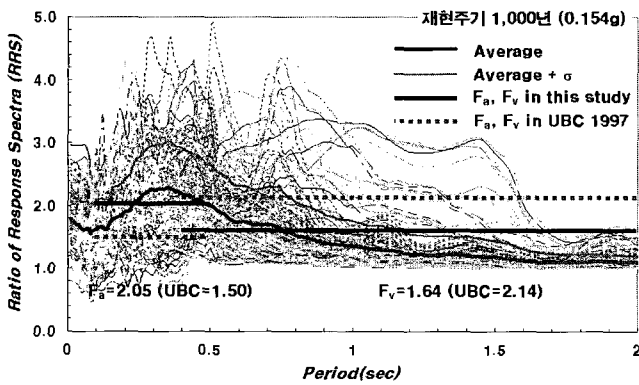
로 단주기 영역에서 내진설계기준의 값보다 크게 증폭되는 현상이 발견되고, 장주기 영역에서는 내진설계기준의 값보다 상당히 작아진다. S_D 지반의 경우에도 주기 0.4초와 0.5초 사이를 기준으로 같은 현상을 관찰할 수 있다.



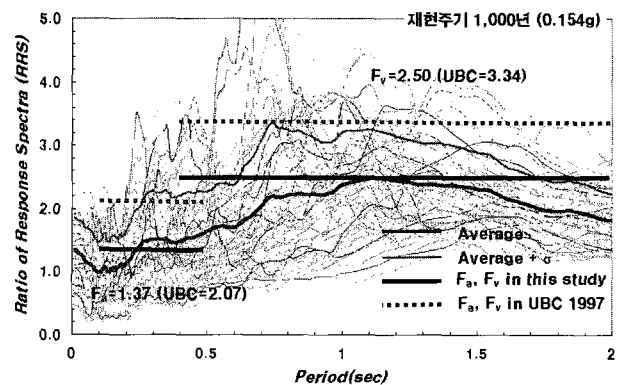
(a) Soil Type S_B



(b) Soil Type S_C



(c) Soil Type S_D



(d) Soil Type S_E

그림 8 재현주기 1,000년에 대한 지반 종류별 RRS 값의 경향성 검토(지반분류 기준 - V_{S30})

위와 같은 현상은 국내 S_C 및 S_D 지반의 경우 기반암이 대부분 30m 이내에 존재하고 미국 서부해안지역의 지반특성과는 많은 차이가 있어 해석결과와 내진설계기준에 많은 차이가 나타난 것으로 판단된다. 따라서 1997 UBC 기준을 그대로 준용하고 있는 국내 내진설계기준에서 S_C 지반과 S_D 지반의 경우 설계응답스펙트럼을 국내 지반 특성에 적합하도록 재작성해야 내진설계의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

그림 7(d)에 나타난 S_E 지반의 경우 위의 S_C 지반과 S_D 지반과는 달리 내진설계기준연구(II)에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼의 값보다 평균값 및 평균값 + 표준편차의 값을 대부분 만족시키고 있다. 즉, S_E 지반의 경우 표 2에 나타난 바와 같이 기반암의 평균 깊이가 심도 38.5m이므로 V_{S30} 을 이용하는 취지에도 부합하는 지반조건이다. 따라서, S_E 지반의 경우 현재의 기준에 부합되는 지반으로 판단할 수 있다. 그러나, S_E 지반의 해석에서 얻어진 평균값이 설계기준의 값보다 작아 연약한 지반에서 단주기 부분의 설계응답스펙트럼에 대한 재산정의 여지가 있다고 판단된다.

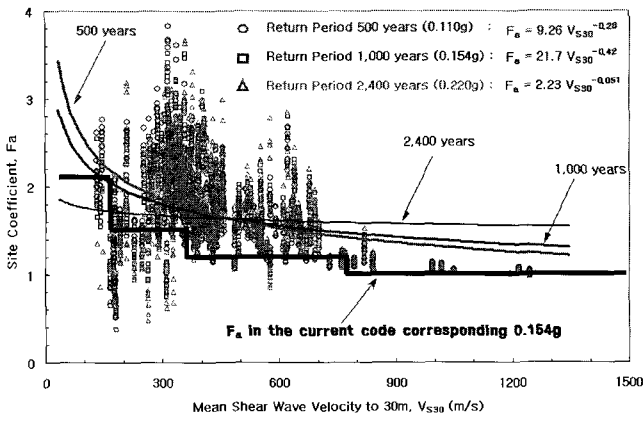
4.3 증폭계수(F_a , F_v)의 재산정 및 RRS 값의 경향성 검토

1차원 등가선형 지진응답해석을 수행하여 얻어진 증폭

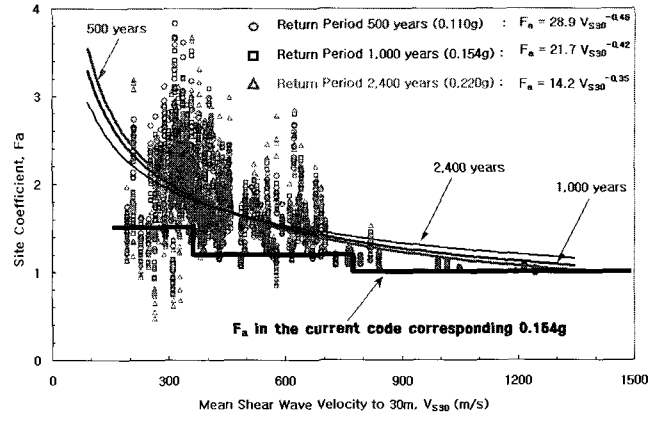
계수 F_a 와 F_v 및 표준편차는 각각 표 4와 표 5에 정리하였고, 각각의 지반종류에 대하여 구조물 주기 0초 - 2.0초 사이의 RRS 값에 대한 결과는 그림 8에 나타내었다. 본 연구에서는 세 가지 재현주기에 대하여 지진응답해석을 수행하였으나, 여기에서는 재현주기 1,000년에 해당하는 해석결과에 대하여 나타내었고 이를 바탕으로 서술하였다.

그림 8에 나타난 증폭계수는 1994 NEHRP의 증폭계수를 계산했던 방법인 식 (3)과 식 (4)를 이용하였으며, F_v 의 경우 평균값 + 표준편차의 값으로 산정하였다.⁽⁵⁾ 그림 8(a)의 S_B 지반의 경우 F_a 값은 1.09, F_v 값은 1.01으로 산정되어 F_a 에서 UBC의 값과 비교하여 큰 차이는 발생하지 않았다. 그림 8(b)와 그림 8(c)의 S_C 지반과 S_D 지반에서 계산된 증폭계수의 특징을 살펴보면, 모두 단주기 영역에서 증폭이 장주기 영역에서의 증폭보다 크게 나타났다. 즉, F_a 의 값이 F_v 의 값보다 큰 값을 가지고, 이러한 현상은 UBC 기준의 경우 F_a 값이 F_v 값보다 작은 것과 비교하면 정반대의 경향을 보이고 있다. 국내 지반이 단주기 영역에서 큰 증폭현상이 나타나는 이유는 그림 3과 표 2에 나타난 바와 같이 기반암의 깊이가 얕아 지반의 고유주기가 단주기 영역에 해당하기 때문이다.

한편, S_C 지반과 S_D 지반의 경우 장주기 영역에서 RRS 값의 경향이 많이 다른 것을 볼 수 있다. S_C 지반의 경우 주기 0.5초 이상의 장주기 영역에서 RRS 값이 대부

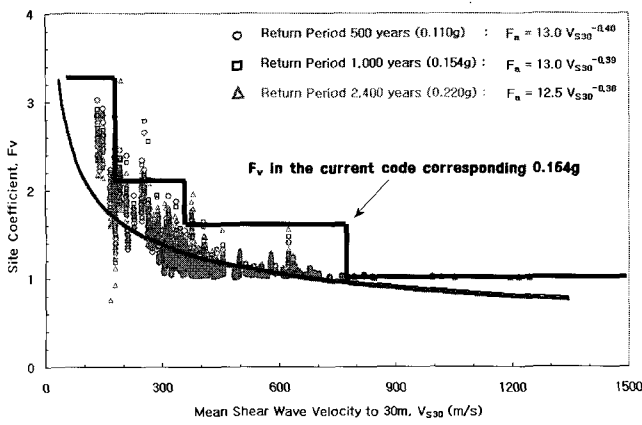


(a) S_E 지반을 포함한 VS₃₀에 따른 증폭계수 F_a의 변화

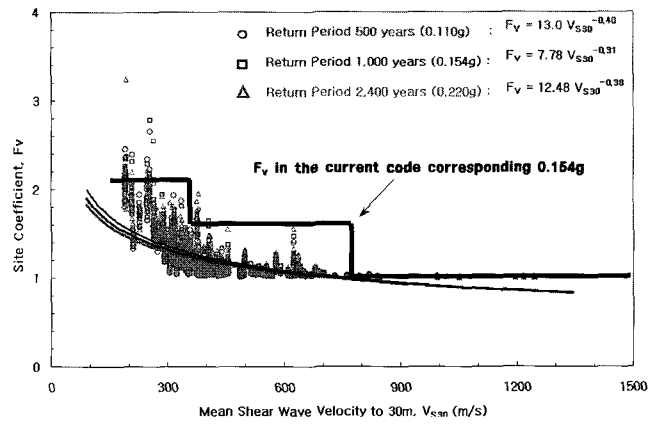


(b) S_E 지반을 제외한 VS₃₀에 따른 증폭계수 F_a의 변화

그림 9 증폭계수 F_a와 VS₃₀과의 상관관계



(a) S_E 지반을 포함한 VS₃₀에 따른 증폭계수 F_v의 변화



(b) S_E 지반을 제외한 VS₃₀에 따른 증폭계수 F_v의 변화

그림 10 증폭계수 F_v와 VS₃₀과의 상관관계

분 점점 작아서 1.0의 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그러나, S_D 지반의 경우 0.5초 이상의 장주기 영역에서 RRS 값이 크게 증폭되는 경우가 존재한다. 이는 S_D 지반의 경우 일부 지반에서 기반암이 심도 30m 이상 위치한 경우가 있어 이러한 지반에서는 장주기 영역에서 스펙트럴 가속도의 증폭현상이 발생하기 때문으로 분석된다.

표 4와 표 5에 나타나 있는 해석결과의 값을 살펴보면 S_B 지반의 경우 F_a와 F_v의 표준편차 값이 매우 작게 나타나 스펙트럴 가속도의 값은 지진파와 지반조건에 의한 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나, S_C 지반과 S_D 지반의 경우 표준편차의 값이 상대적으로 크게 나타났고, 이는 F_a와 F_v의 산란정도가 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 실제로 그림 8에 나타난 바와 같이 주기에 따른 RRS 값을 비교해보면 S_C 및 S_D 지반에서 RRS 값의 산란정도가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 표 2에 나타난 바와 같이 S_C 지반과 S_D 지반의 경우 S_B 지반보다 지반의 고유주기의 범위가 상대적으로 넓게 분포되어 있어 스펙트럴 가속도가 크게 증폭되는 영역이 넓게 분포되었고 표준편차의 값도 크게 나타난 것으로 판단된다.

그림 8(d)의 S_E 지반의 경우 S_C 지반과 S_D 지반의 결

과와 다른 경향을 보이고 있다. 즉, F_a의 값이 F_v의 값보다 작고, 이러한 경향은 UBC 기준의 경향과도 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 국내 지반의 해석결과에서 얻어진 증폭계수의 값이 UBC의 값보다 작게 나타난 점은 차이가 있다. S_D 지반의 경우 일부 해석결과에서 주기 0.5초에서 1.5초 사이의 장주기 영역에서 큰 증폭이 발생하는 지반이 존재한다. 이러한 지반의 경우 기반암의 깊이가 30m~50m 사이에 존재하는 경우로서 UBC 기준의 값과 비슷한 경향을 보인다.

표 4와 표 5에 나타난 바와 같이 S_B, S_C 그리고 S_D 지반의 경우 재현주기에 따른 암반노두 가속도의 증가에 따라 F_a와 F_v의 값은 큰 차이가 나타나지 않았으며 이는 지반의 비선형 거동에 대한 영향이 미비함을 의미한다. 그러나, S_E 지반의 경우 재현주기가 증가함에 따라 F_a의 경우 약 10%의 감소가 발생하였고, F_v의 경우 큰 차이가 발생하지 않았다. 따라서, 연약한 지반의 경우 지진가속도가 증가함에 따라 지반의 비선형 거동에 대한 영향이 나타남을 알 수 있다.

위와 같은 국내 지반에 대한 해석결과는 국내 내진설계기준이 국내의 일반적인 지반특성을 제대로 반영하지

못하고 있어, 국내 지반에 적합하도록 지반분류 방법과 설계응답스펙트럼을 개선할 필요성에 대하여 더욱 명확한 증거를 제시해 주고 있다.

4.4 증폭계수와 V_{S30} 과의 상관관계에 대한 검토

내진설계기준에서 지반을 분류하는 기준인 V_{S30} 과 F_a 및 F_v 의 상관관계는 그림 9와 그림 10에 각각 나타내었다. 위에서 언급한 바와 같이 S_E 지반의 경우 지진가속도의 증가에 따른 지반의 비선형 거동의 영향으로 다른 지반에 비하여 다른 특성을 보이고 있고, 또한 F_a 의 값이 F_v 의 값보다 작아 다른 지반의 경향과는 반대의 경향을 보이고 있어 모든 지반을 동일한 방법으로 경향성을 파악하는 것은 오류를 범할 수 있다. 따라서, V_{S30} 에 따른 증폭계수와 F_a 의 상관관계를 S_E 지반을 포함하였을 경우와 포함하지 않았을 경우에 대하여 비교하여 보았다.

그림 9(a)의 S_E 지반을 포함한 F_a 와 V_{S30} 의 상관관계를 살펴보면, 굵은 실선으로 표시된 재현주기 1,000년에 대한 UBC 기준의 F_a 의 값과 해석에서 얻어진 F_a 값에는 뚜렷한 차이가 발생하고 있다. V_{S30} 이 대략 320m/sec 보다 클 경우 대부분의 F_a 값은 UBC 또는 국내 설계기준의 값보다 큰 값을 가지고, V_{S30} 이 대략 320m/sec 보다 작을 경우 일부 큰 경우도 있으나 일부는 작은 경우도 발생하고 있다. 특히 S_E 지반의 영역에서는 기준에서 제시하고 있는 값보다 해석에서 얻어진 값이 작은 값을 가지는 경우가 많아지고 있다.

추세선을 기준으로 전체적인 경향은 V_{S30} 이 증가함에 따라서 각 재현주기에 따른 F_a 값이 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. F_a 의 값은 표 4에 나타난 바와 같이 전반적으로 산란정도가 심한 것을 볼 수 있고, V_{S30} 이 작아질수록 산란정도가 점점 커질 뿐만 아니라 V_{S30} 이 180m/sec 보다 작은 영역인 S_E 지반에서는 다른 영역의 값보다 상당히 작아지는 경향을 볼 수 있고, S_E 지반은 다른 지반들과는 특성이 매우 다름을 확인할 수 있다. 따라서, F_a 의 전체적인 추세를 파악하기 위하여는 S_E 지반을 제외하여 별도로 고려하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

그림 9(b)의 S_E 지반을 제외한 F_a 와 V_{S30} 의 상관관계를 살펴보면, 재현주기에 따른 추세선의 경향이 일치할 뿐만 아니라 큰 차이가 발생하지 않고 있다. 이러한 결과는 앞에서 언급했던 바와 같이 S_B , S_C 및 S_D 지반의 경우 암반도 두 가속도의 증가로 인한 지반의 비선형 거동의 영향이 나타나지 않는다는 결과와 일치한다.

그림 10(a)의 S_E 지반을 포함한 F_v 와 V_{S30} 의 상관관계를 살펴보면, V_{S30} 이 증가함에 따라서 F_v 값이 1.0에 수렴하는 경향을 보이고 있다. F_v 의 세 가지 재현주기에 따른 추세선의 변화를 살펴보면, 세 가지 추세선이 육안으로는 구분하기 힘들 정도로 일치하여 재현주기에 따른 암반도 두 가속도의 영향은 미미하다고 판단된다. 또한, 그림 10(b)의 S_E 지반을 제외한 상관관계를 살펴보아도 재현주

기에 대한 영향이 크게 나타나지 않고 있고, F_v 의 경우 S_E 지반을 포함 여부에 관계없이 V_{S30} 과의 상관관계의 경향성이 뚜렷하게 나타났다.

5. 설계응답스펙트럼의 작성

본 절에서는 4장에서 수행한 국내 지반의 해석대상부지에 대한 지진응답해석 결과와 표 4와 표 5에 정리된 증폭계수를 이용하여 각 지반종류에 따른 설계응답스펙트럼을 작성해 보았다. 응답스펙트럼의 작성법은 내진설계기준연구(II) 또는 1997 UBC의 작성방법을 따랐다. 재현주기 1,000년에 대한 스펙트럴 가속도의 평균값과 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 계산한 F_a 및 F_v 값을 이용하여 산정한 응답스펙트럼 및 국내 내진설계에서 제시하고 있는 표준 설계응답스펙트럼 값을 지반종류에 따라 그림 11에 비교하였다.

S_B 지반의 경우 표 4와 표 5에 나타난 바와 같이 UBC 기준의 증폭계수 값과 본 연구의 증폭계수 값 차이가 크게 나타나지 않아 그림 11(a)에 나타난 두 응답스펙트럼은 큰 차이를 보이지 않았다. 그림 11(b)의 경우 V_{S30} 을 기준으로 분류된 S_C 지반의 스펙트럴 가속도 평균값과 해석에서 얻어진 재산정된 증폭계수를 이용한 응답스펙트럼이 내진설계기준연구(II)에서 제시하고 있는 응답스펙트럼보다 개선의 효과가 뚜렷함을 볼 수 있다. 그림 11(c)의 S_D 지반의 경우도 S_C 지반과 마찬가지로 해석을 이용하여 재산정된 응답스펙트럼이 S_D 지반의 평균 스펙트럴 가속도 값과 잘 일치하고 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 표준 설계응답스펙트럼과는 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

S_C 지반의 경우 주기 0.1초에서 0.2초 사이에서 스펙트럴 가속도의 평균값이 크게 증폭되어 재산정된 응답스펙트럼의 값보다 크게 나타났고, S_D 지반의 경우 주기 0.3초~0.4초 사이에서 평균 스펙트럴 가속도 값이 크게 증폭된 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 표 2에 나타난 바와 같이 S_C 지반의 고유주기 평균값이 0.22초, S_D 지반의 경우 0.37초 이기 때문에 지반의 고유주기 부근에서 큰 증폭이 발생하기 때문이다.

위와 같은 결과는 표 4와 표 5에 나타난 바와 같이 국내 내진설계기준의 근간인 1997 UBC 기준의 증폭계수와 국내 지반에 대한 지진응답해석 결과에서 얻어진 증폭계수의 값에 큰 차이가 있기 때문이다. 특히, 국내 지반의 대부분을 차지하고 있는 지반은 S_C 지반과 S_D 지반임을 고려하면 국내 내진설계기준에서 제시되어 있는 증폭계수의 값은 국내 지반특성에 적합하도록 재산정할 필요성을 재확인할 수 있다.

그림 11(d)의 S_E 지반의 경우 다른 지반의 결과와는 달리 국내 지반에 대한 해석결과에서 얻어진 응답스펙트럼이 단주기와 장주기 부분에서 모두 내진설계기준의 값보다 작게 나타났다. 또한, S_E 지반의 평균 스펙트럴 가

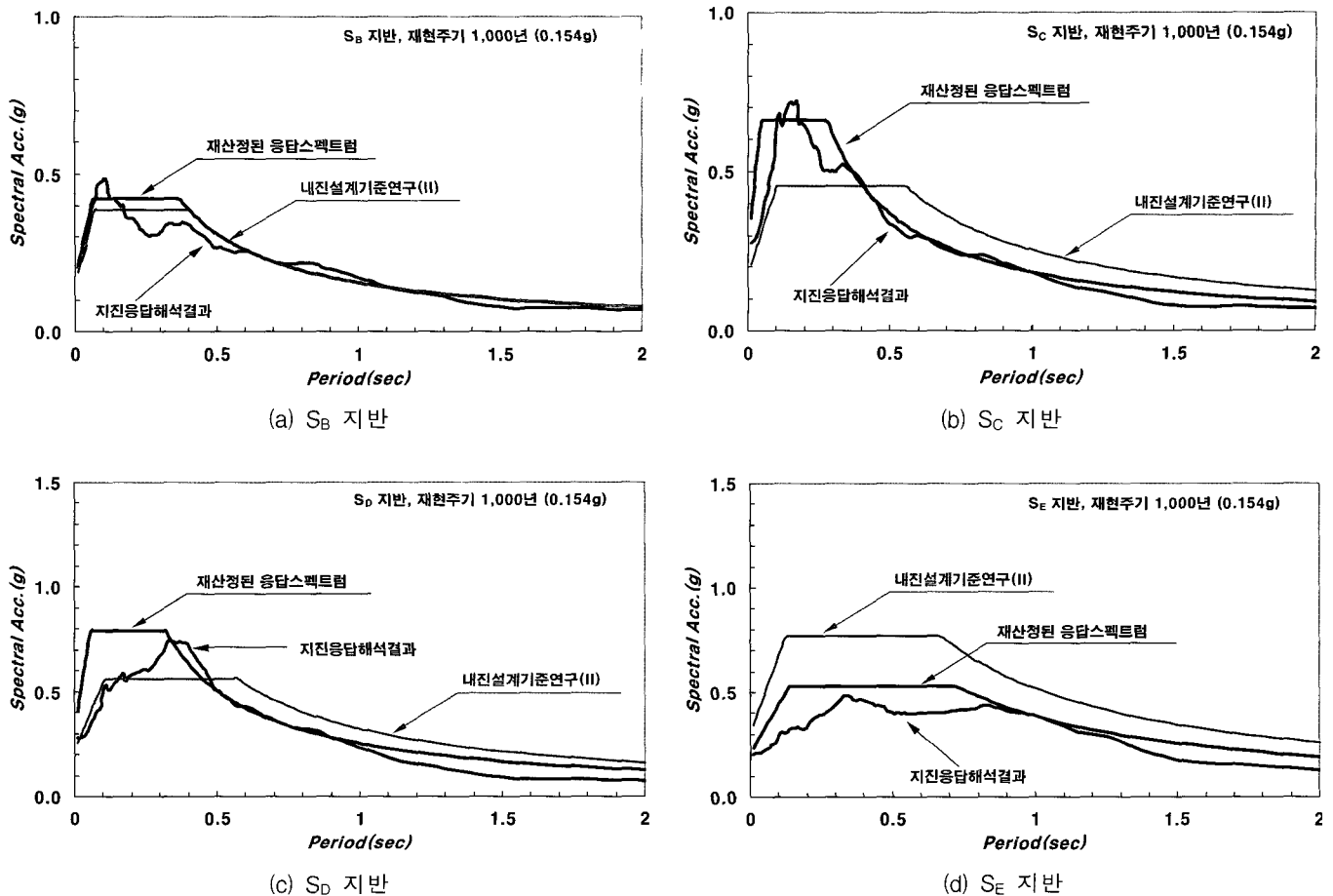


그림 11 재현주기 1,000년에 대한 지반 종류별 설계응답스펙트럼(지반분류 기준 - V_{S30})

속도의 값과 해석에서 재산정된 증폭계수를 이용한 응답 스펙트럼의 값과 매우 유사한 경향을 보였으나, 내진설계 기준에서 제시하고 있는 표준 설계응답스펙트럼의 값은 매우 크게 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내의 162개 지반에 대한 지진응답해석을 수행하여 내진설계기준의 상위개념으로 1997년 제정된 내진설계기준연구(II)의 설계응답스펙트럼과 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

국내의 일반적인 특성을 가지는 지반과 미국 서부해안 지역의 지반은 기반암 깊이와 고유주기가 매우 다름을 확인하였다. 미국 서부해안지역 지반조건에 적합하도록 작성된 미국 1997 UBC 기준을 토대로 제정된 국내 내진설계기준의 지반분류 방법과 설계응답스펙트럼 결정 방법은 국내 지반조건에 적합하도록 개선될 필요성을 확인하였다.

국내 지반에 대한 지진응답해석결과 1997 UBC 기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼을 결정하기 위한 증폭계수(F_a , F_v)는 국내의 일반적인 지반특성과 현격한 차이가 있음을 확인하였다. 특히, 1997 UBC 기준에서 제시하고 있는 증폭계수는 국내 지반특성에 비하여 단주기 영역의 증폭을 과소평가하고 있으며, 장주기 영역의 증폭

은 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 국내 지반특성에 적합하도록 증폭계수의 재산정이 필요하다고 판단된다.

설계응답스펙트럼을 작성하기 위해서는 증폭계수의 산정이 선행되어야 하고, 증폭계수의 산정에 절대적으로 영향을 미치는 요소는 지반분류임을 고려하면, 미국 서부해안지역 지반조건과 국내 지반조건에 많은 차이가 있으므로 국내 지반의 지반분류 방법의 개선이 절실히 필요하다. 특히, 국내의 경우 기반암 깊이가 대부분 심도 30m 이내에 존재하여 V_{S30} 을 이용할 경우 암반의 영향이 지나치게 크게 반영되는 등의 문제점이 발생하므로, 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법에 대한 개선이 무엇보다 선행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 내진설계 기준연구 (II), 1997.
2. NEHRP, *Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures*, FEMA 302/303, February, Part I. (Provisions) and Part. 2(Commentary)., 1997.
3. ICBO, *1997 Uniform building code, Volume 2 - Structural engineering design provisions*, Interna-

- tional Conference of Building Officials, 1997, 492pp.
4. 윤종구, 김동수, "국내 지반특성에 적합한 설계지반운동 결정 방법에 대한 연구", 한국지진공학회논문집, 제 8권 제3호, 2004, pp. 23-32.
 5. MCEER-99-0010, *Site Factors and Site Categories in Seismic Codes*, Ricardo Dobry, Ricardo Ramos and Maurice S. Power. July 19, 1999.
 6. Bardet, J.P., Nielsen, E., Villacorta, R., ROSRINE data dissemination, <http://geoinfo.usc.edu/rosrine>, Accessed 12 June 2001.
 7. Sun, C.G.. "Geotechnical information system and site amplification characteristics for earthquake ground motions at inland of the Korean Peninsula," Ph. D. Dissertation, Seoul Nation University, Feb, 2004.
 8. <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>
 9. 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, 1972.
 10. Idriss, I. M., and Sun, J. I., *User's manual for SHAKE91 : A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits*, University of California, Davis, 1992, 13pp.
 11. 김동수, 추연욱, "공진주시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성", 한국지반공학회 논문집, Vol. 17, No. 5, 2001, pp. 115-128.
 12. 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.