

연약지반의 기초지반강성을 고려한 벽식구조 아파트의 지진응답

Seismic Responses of Wall-Slab Apartment Building Structures Built on the Soft Soil Layer Considering the Stiffnesses of a Foundation-Soil System

김 지 원*
Kim, Ji Won

김 용 석**
Kim, Yong Seok

국문요약

구조물의 지진해석시 구조물-지반 상호작용의 영향을 무시할 수 없으며, 기초지반강성에 따른 구조물의 지진응답에 커다란 차이가 있다는 것은 이미 잘 알려져 있다. 이러한 인식에도 불구하고, 현재 벽식구조 아파트의 지진해석시 기초지반의 특성을 무시하고 기초가 매우 단단한 것으로 가정하여 지진해석을 수행하고 있다. 본 연구에서는 구조형식이 독특한 벽식구조 아파트 지진해석을 연약지반을 고려하여 수행하고, 지진응답을 암반과 UBC-97 지반조건인 연약지반을 고려한 지진응답과 비교분석하였다. 깊은 연약지반 위에 세워진 중, 저층 벽식구조 아파트의 내진거동은 기초의 절연효과로 지진응답이 크게 감소된 강체거동을 보여 UBC-97 설계응답스펙트럼으로 내진설계를 하는 것은 보수적인 설계로 안전은 하지만 상당히 비경제적인 것으로 판단되었다.

주요어 : 벽식아파트, 기초지반강성, 연약지반, 지진응답

ABSTRACT

In the seismic analyses of structures, it is well recognized that the effects of soil-structure interaction can not be ignored and seismic responses of a structure taking into account the stiffnesses of a foundation-soil system show the significant difference from those with a rigid base. However, current seismic analyses of apartment building structures were carried out with the rigid base ignoring the characteristics of the foundation and the properties of the underlying soil. In this study, seismic analyses of wall-slab type apartment buildings which have a particular structural type were carried out taking into account the soft soil layer comparing seismic response spectra of a flexible base with those of a rigid base and UBC-97. Low-rise or middle height wall-slab type apartment buildings built on the deep soft soil layer showed a rigid body motion with the reduced seismic responses due to the base isolation effect, indicating that it is considerably safe but uneconomical to utilize the design spectra of UBC-97 for the seismic design of wall-slab type apartment buildings due to conservative design.

Key words : wall-slab apartment building, foundation-soil system, soft soil, seismic response

1. 서 론

최근 건설되는 대부분의 아파트는 벽과 슬래브로 구성된 벽식구조로 되어 있다. 벽식구조 아파트의 평면은 단변 방향의 길이에 비해 장변 방향의 길이가 큰 장방형 형식을 가지고 있으며, 구조체는 전단벽과 슬래브만으로 구성되고, 전단벽이 장변방향보다는 단변방향 위주로 배치되어 횡력에 대한 아파트 전체 강성이 장변방향보다 단변 방향이 큰 독특한 구조형식을 가지고 있다.

이러한 구조형식의 아파트 지진해석을 대부분 기초지반의 특성을 무시하고 암반 위에 건설된 것으로 가정하여 수행하거나, UBC 등의 내진설계 기준에서 제시하는 등가정적 해석법이나 동적해석법으로 수행하고 있다. 그러나 최근 구조물-지반 상호작용에 관한 연구 결과, 구조물 지진거동이 기초와 지반의 특성에 따라 심하게 영향을 받을 수 있는 것으로 잘 알려져 내진설계시 큰 위험성을 초래할 수 있다.

본 연구에서는 일반적인 벽식구조 아파트를 저층, 중층, 고층형으로 분류하여 지진해석을 수행하고, 기초지반의 특

성은 암반지반과 UBC-97⁽¹⁾에서 분류한 매우 연약한 지반에 해당하는 S_E 지반과 비교적 단단한 S_D 지반을 고려하였으며, S_E 지반은 파일기초로 지반을 보강한 경우도 함께 고려하여, 기초지반강성에 영향을 주는 기초지반깊이를 변수로 하여 아파트의 지진응답스펙트럼을 분석하고, UBC-97 설계응답스펙트럼과도 비교하여 연약지반 위에 세워진 벽식구조 아파트의 지진응답을 분석하였다.

2. 지진해석 모델링

우리나라의 벽식구조 아파트 평면은 세대간의 분리와 한 세대내의 실 구분을 위해 주로 단변방향으로 전단벽을 배치하여 단변방향에 비해 장변방향이 매우 구조적으로 취약하다. 이러한 평면형식을 갖고 있는 벽식구조 아파트 중 특히 장변방향 강성이 상대적으로 매우 작은 그림 1에 나타난 것과 같은 평면을 갖는 아파트를 해석모델로 설정하였다.

해석모델은 강호근 등⁽²⁾이 사용한 12.1m×29.2m의 2세대를 코어로 연결한 평면형태를 사용하고, 지하 1층에서 지상 25층까지 분석하였으며, 아파트 층고는 지상 15층까지는 2.6m, 16층이상은 2.8m로 가정하였다.

기초지반은 지반상태가 균질한 연약지반으로 N치가 대략 10정도의 전단파속도(C_s) 130m/sec인 S_E 지반과 N치 20정도의

* 학생회원 · 목포대학교 건축공학과, 석사과정(대표저자 : prjiny@hanmail.net)

** 정회원 · 목포대학교 건축공학과, 부교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 1. 5 / 심사종료일 : 2001. 2. 2)

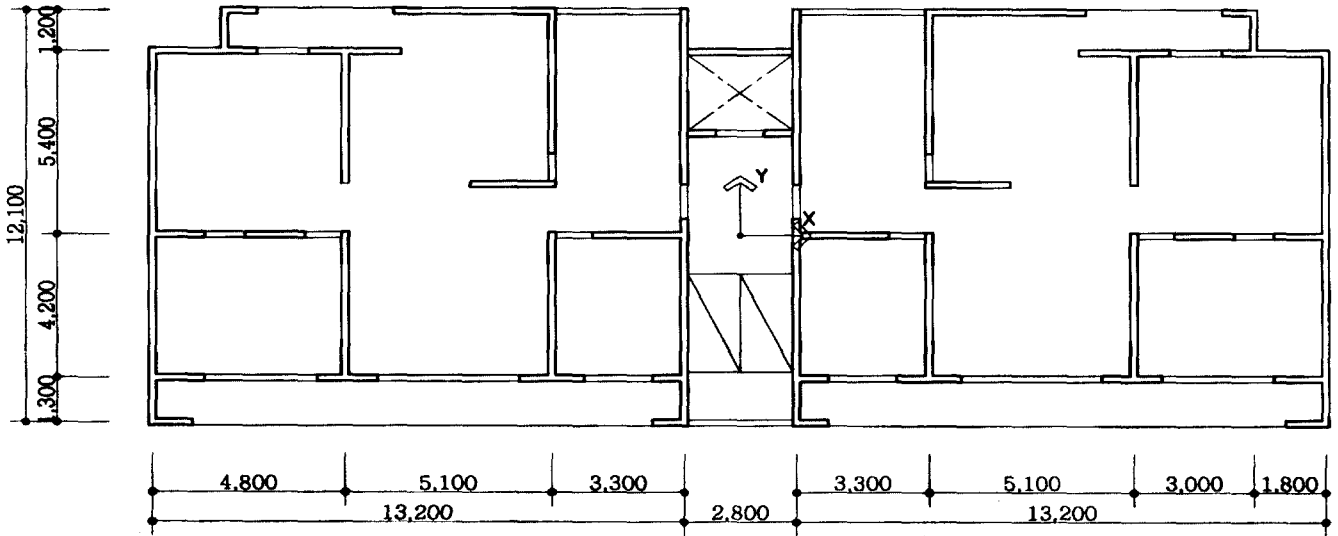


그림 1 지진해석 아파트 평면

전단파속도 220m/sec인 S_D 지반을 고려하였으며, 지반의 단위중량은 각각 17.64KN/m^3 와 18.62KN/m^3 로 가정하였으며, 감쇠비(D)와 포아송비(ν)는 모두 0.05, 0.3으로 가정하였다. 그리고 기초지반깊이(H)는 10m와 30m를 고려하였으며, 기초문합깊이(E)는 4.0m, 기초반경(R)은 10.6m로 가정하였다.

연약지반 위에 세워진 아파트 지진해석은 그림 2에서 표현한 것처럼 기초지반의 강성을 기초저면에 등가강성 스프링으로 입력하여 지진해석을 할 수 있는 부구조물 해석법으로 수행하였고, 부구조물 해석법으로 지진해석을 하기 위해 구조물-지반 상호작용의 영향을 고려한 기초저면에서의 입력지진을 구하여 분석하였다.^{(3),(4)}

표 1 등가정적 강성식에 의한 연약지반의 기초지반강성

지반 강성 (KN/m)		기초지반 깊이	
		10m	30m
S_E 지반 (N치 10)	수평 방향	4.337E+06	2.596E+06
	수직 방향	7.603E+06	3.493E+06
S_D 지반 (N치 20)	수평 방향	1.245E+07	7.453E+06
	수직 방향	2.183E+07	1.003E+07
S_E 지반 파일기초	수평 방향	4.337E+06	2.596E+06
	수직 방향	2.763E+08	1.269E+08

진기록을 기초저면의 지진기록을 구하기 위해 식 (3)의 Kim (1984)이 제안한 변환식⁽⁶⁾을 곱하여 기초저면 입력지진을 구한 후 역푸리에 변환(IFFT)하여 시간영역에서 입력지진을 구하였다.

$$K_h = \frac{8GR}{2-\nu} \left[1 + \frac{2}{3} \frac{E}{R} \right] \left[1 + \frac{5}{4} \frac{E}{H} \right] \left[1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H} \right]$$

$$K_v = \frac{4GR}{1-\nu} \left[1 + 1.28 \frac{R}{H} \right] \left[1 + 0.47 \frac{E}{R} \right]$$

$$\left[1 + \left(0.85 - 0.28 \frac{E}{R} \right) \frac{E/H}{1-E/H} \right] \quad (1)$$

여기서,

- R : 원형기초반경
- E : 기초문합깊이
- H : 기초지반깊이
- G : 지반 전단탄성계수
- ν : 지반 포아송비

$$A.F. = \frac{2}{e^{-\frac{i\omega H}{C_s(1+i2D)}} + e^{-\frac{i\omega H}{C_s(1+i2D)}}} \quad (2)$$

여기서,

- C_s : 지반 전단파속도
- D : 지반 감쇠비

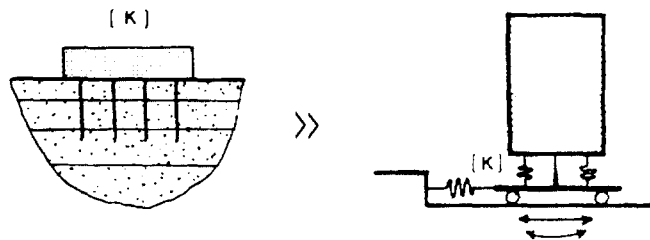


그림 2 부구조물 해석법

3. 기초지반 강성

기초지반강성은 유한한 지반 위에 묻혀 있는 원형기초에 대한 식 (1)의 등가정적 강성식⁽⁵⁾으로 표 1에 나타난 것과 같이 구하였으며, 파일기초 지반강성은 등가정적 강성식으로 구할 수 없으므로 수평지반강성의 경우 파일의 영향이 거의 없으므로 강성을 무시하였고, 파일기초 수직지반강성은 연약지반 강성에 비해 매우 크기 때문에 S_B 지반 강성과 S_E 지반 강성의 평균값을 사용하였다.⁽⁴⁾ 그리고 아파트 기초저면에서의 입력지진은 지반 특성의 불확실성으로 직접 구하기 어렵기 때문에 암반에서 지진기록을 시간영역에서 주파수영역으로 푸리에 변환(FFT)한 후, 지표면의 지진기록을 구하기 위한 식 (2)의 증폭계수를 곱하고, 다시 지표면에서 구한 지

$$T.F. = \begin{cases} \cos \frac{\pi}{2} \frac{f}{f_0} & \text{for } f \leq \alpha \cdot f_0 \\ \cos \frac{\pi}{2} \alpha & \text{for } f \geq \alpha \cdot f_0 \end{cases} \quad (3)$$

여기서,

f_0 : 지반 고유주파수

α : 기초반경에 대한 기초문힘깊이비

4. 고유치 해석

아파트 지진해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000으로 아파트를 쉘요소(shell element)로 구성하여 부구조물 해석법으로 모델링 한 후 기초지반 등가정적 강성계수는 SAP2000의 댐퍼(damper)요소가 강성과 감쇠를 동시에 고려할 수 있으므로 이를 이용하여 등가정적 강성식으로 구한 연약지반의 강성과 지반 감쇠비를 함께 기초저면에 입력하였다.^{(4),(5),(7)}

유한요소로 모델링한 아파트 기초저면에 댐퍼요소의 적절한 모델링 방법을 찾기 위해 25층 벽식구조 아파트를 표 2에 나타난 5가지 해석지반조건으로 해석하고 고유주기를 비교하였다.

고정지반 모델의 경우, 장변방향 고유주기가 1.45sec로 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS를 이용해 강호근 등⁽²⁾이 구한 1.48sec와 매우 근사하게 나타났는데, 약간의 차이가 발생한 것은 본 연구에서는 아파트 바닥판을 무한강성이 아닌 실제 유연한 강성을 가진 유한요소의 쉘요소로 고려했기 때문으로 판단되었다.⁽²⁾

위의 해석결과에 의하면, 수평 장변이나 단변 지반강성만을 고려한 경우는 기초지반강성 영향으로 고유주기가 커지고, 수직방향 지반강성만을 고려한 경우는 기초의 회전운동(rocking motion) 영향으로 고유주기가 상당히 커졌다. 또한 수평 장·단변 및 수직방향 지반강성을 모두 고려한 경우에는 수직방향 강성만을 고려한 경우보다 고유주기가 더 커졌다. 이와 같이 기초지반의 수평 및 수직방향 강성 모두 아파트-지반 체계의 고유주기에 큰 영향을 미치고, 수직방향 지반강성은 기초지반의 회전강성과 직접적인 관계가 있는 것으로 나타나 표 3에서 수직방향 지반강성의 입력위치에 따른 회전방향 지반강성을 유추하여 비교한 결과, 수직방향 지반강성을 기초지반에 균등하게 입력한 경우가 회전방향 지반강성을 가장 유사하게 고려할 수 있었으며, 아파트의 장변과

표 2 기초지반강성을 고려하기 위한 고유주기 비교

Type	장변 방향 주기 (sec)	단변 방향 주기 (sec)
고정지반 조건	1.45	1.16
수평 장변방향 지반강성만 고려	1.47	1.16
수평 단변방향 지반강성만 고려	1.45	1.18
수직 방향 지반강성만 고려	1.81	2.43
수평 장·단변 및 수직방향 지반강성 고려	1.86	2.46

표 3 등가정적 회전강성과 아파트의 장·단변 회전강성의 평균

	회전 강성 (KN/m)
등가정적 강성식	3.209E+08
기초저면에 균등하게 수직강성을 입력한 경우	(5.222E+08+1.044E+08)/2=3.133E+08

단변방향 회전강성의 평균이 등가정적 강성식의 회전강성과 거의 같은 것으로 보아 부구조물 해석법으로 유한요소 프로그램을 이용한 아파트의 3차원 지진해석시 수평 및 수직 방향 기초지반강성을 모두 기초저면에 균등하게 입력하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

5. 지진응답스펙트럼 비교

벽식구조 아파트의 감쇠율은 5%로 가정하였으며, 유한요소(FEM) 모델 지진응답스펙트럼은 유한요소해석으로 아파트 1층 바닥판 위치의 최대응답가속도를 시간영역에서 구하여 작성하였고, 단자유도계 지진응답스펙트럼은 등가모델링으로 질량은 아파트 전체질량의 75%, 높이는 건물높이의 2/3, 강성은 주기에 따라 입력하여 최대응답가속도로 지진응답스펙트럼을 작성하여, 유한요소 모델 지진응답스펙트럼을 단자유도계 지진응답스펙트럼 및 UBC-97 설계응답스펙트럼과 비교 검토하여 벽식구조 아파트와 일반적인 골조형식 구조물과의 지진응답의 차이를 비교하고, 내진설계시 일반적으로 사용되는 설계응답스펙트럼과 비교하여 내진안전성을 비교하였다. 입력지진은 미국에서 발생한 중진에 해당하는 1952년 Taft E-W 지진기록과 강진에 해당하는 1940년 El Centro N-S 지진기록을 사용하였다.^{(1),(8)}

그림 3, 4는 암반 위에 세워진 벽식구조 아파트의 단자유도계(SDOFS)와 유한요소(FEM) 모델에 대한 Taft와 El Centro 지진응답스펙트럼을 나타내고 있다.⁽⁹⁾ 벽식구조 아파트의 단자유도계와 유한요소 모델의 응답스펙트럼이 전체적으로 비슷하나, 유한요소 모델의 응답스펙트럼이 저주기 영역에서 30-70%정도 작게 나타났으며, 유한요소 모델의 장변방향 최대응답가속도가 단변방향보다 저주기 영역에서 약간 크게 나타났다. 이러한 현상은 중진이나 강진 모두 같은 경향을 보였는데, 이는 중·저층 벽식구조 아파트가 일반적인 골조형식 구조물과 다른 지진거동을 보이는 것을 알 수 있었다.

5.1 연약지반 영향 비교

그림 5, 6에는 기초지반깊이가 10m와 30m인 S_D지반 위에 세워진 구조물의 단자유도계(SDOFS)와 아파트 유한요소 모델의 Taft와 El Centro 지진응답스펙트럼이 나타나 있다. 연약지반을 고려한 응답스펙트럼에서 고유주기가 고정지반 단자유도계 고유주기에서 연약지반의 고유주기로 바뀐 것을 알 수 있고, 연약지반을 고려한 단자유도계의 최대응답가속도가 공진현상으로 지반의 고유주기에서 크게 증폭되었으나 유한요소(FEM) 모델에서는 공진현상이 미비하였으며, 지반의

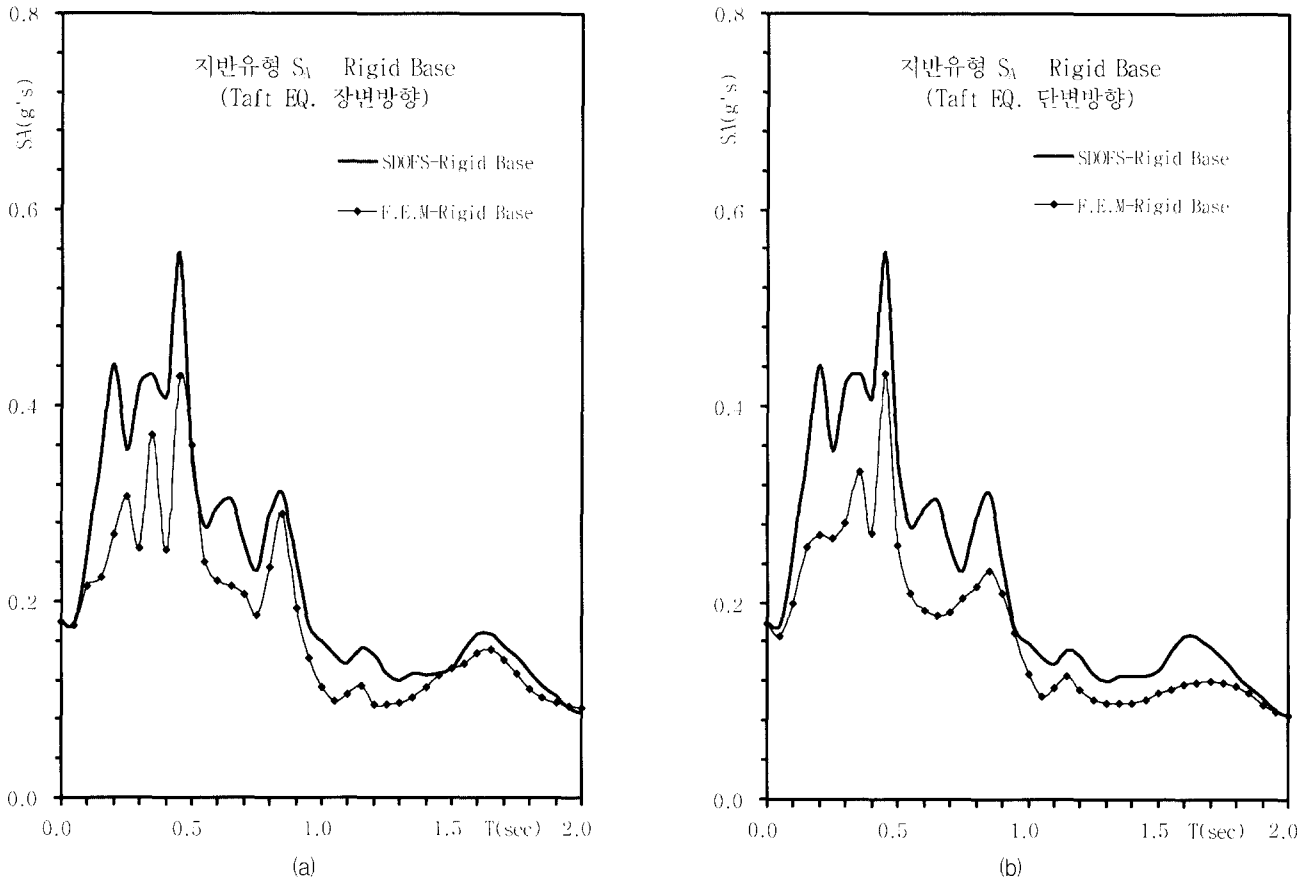


그림 3 암반 위에 세워진 아파트의 Taft 지진응답스펙트럼

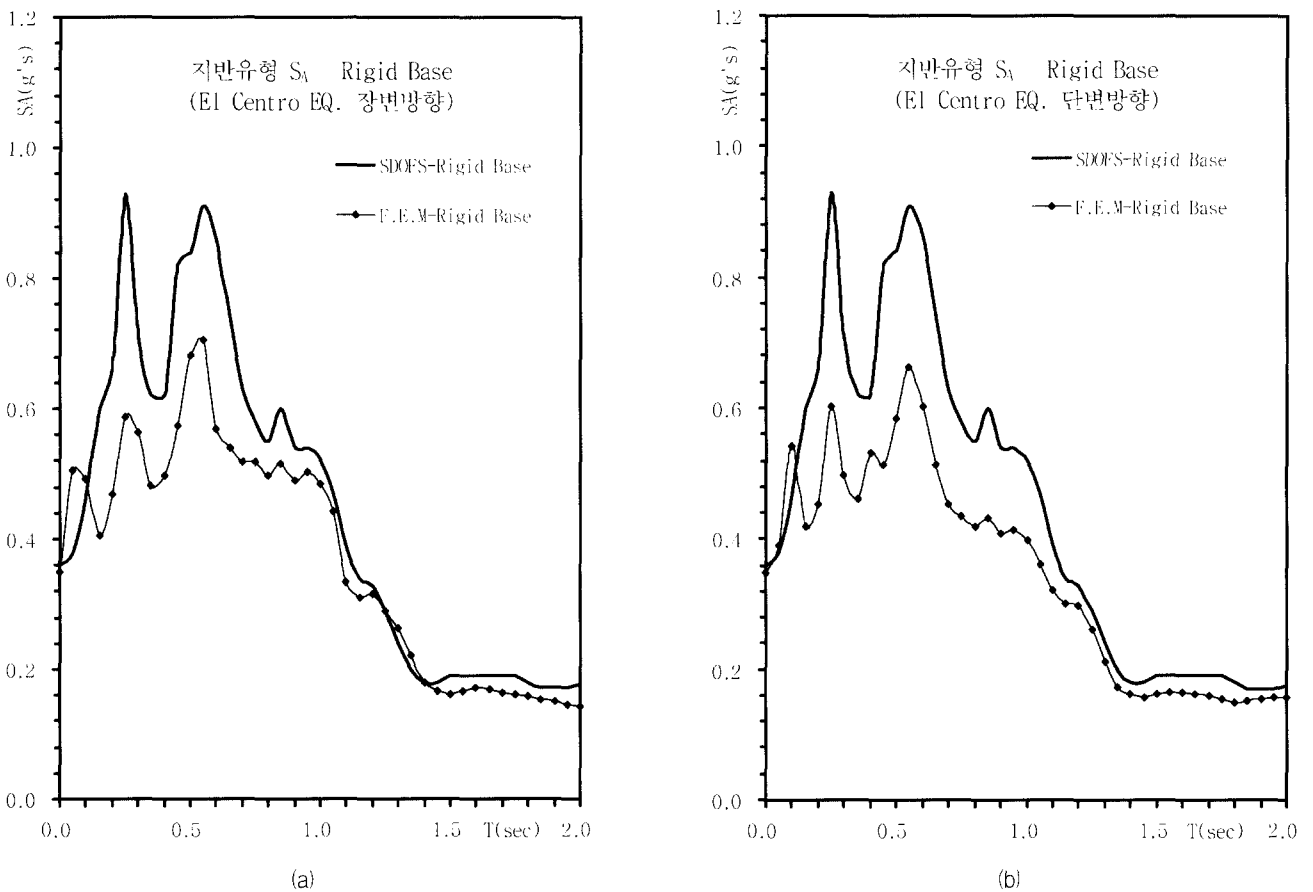


그림 4 암반 위에 세워진 아파트의 El Centro 지진응답스펙트럼

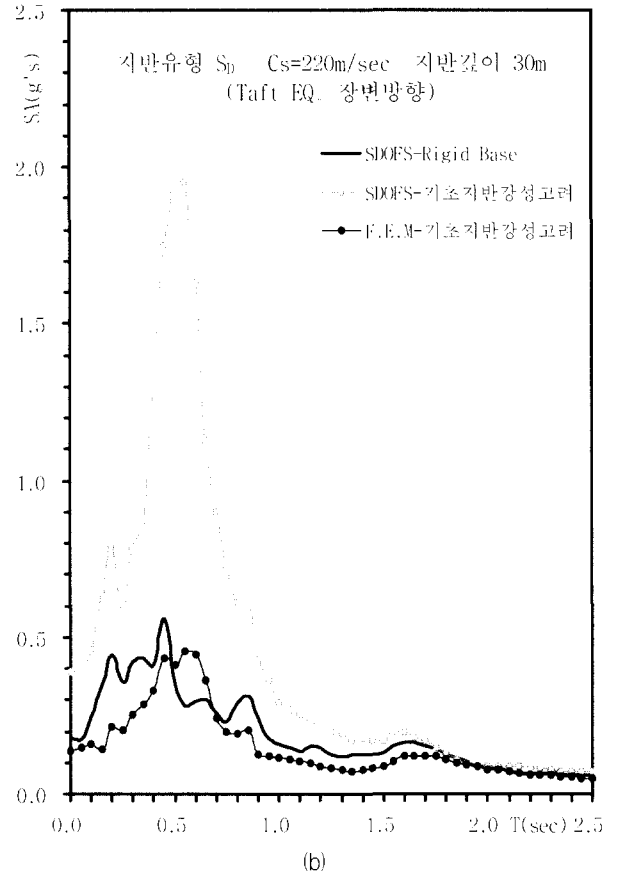
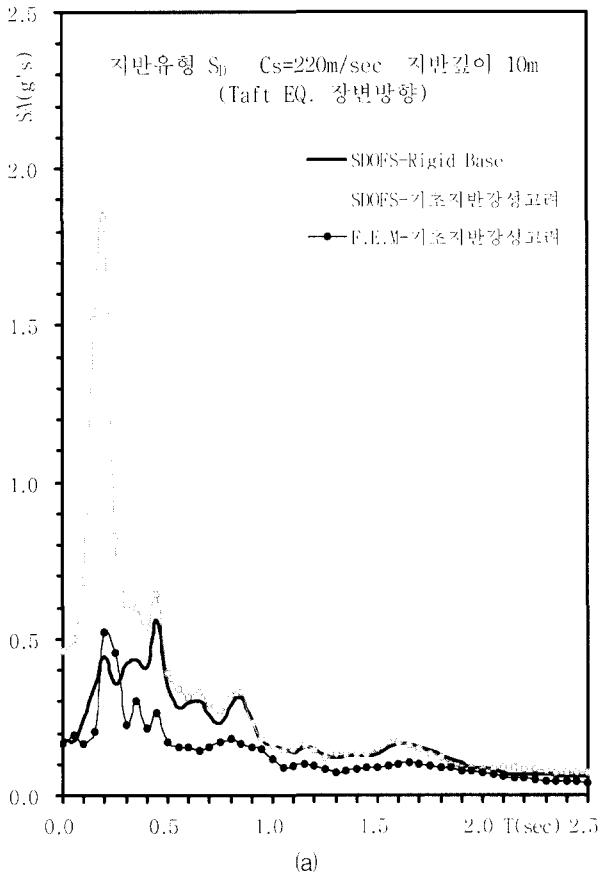


그림 5 깊이 10m와 30m S_D 지반 위에 세워진 아파트의 Taft 지진응답스펙트럼

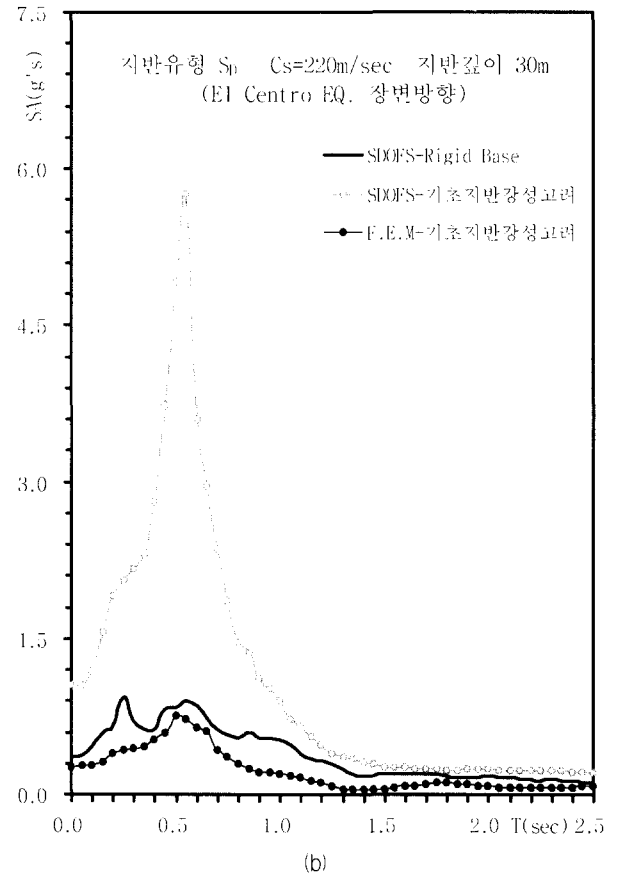
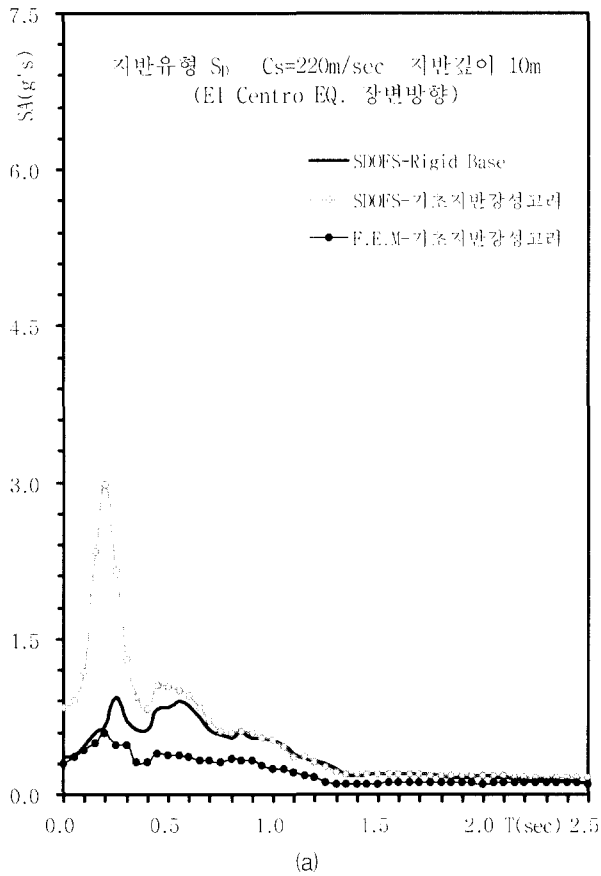


그림 6 깊이 10m와 30m S_D 지반 위에 세워진 아파트의 El Centro 지진응답스펙트럼

종류, 지반깊이, 지진의 크기 및 방향에 상관없이 유사하게 나타났다. 이와 같이 연약지반 위에 세워진 벽식구조 아파트의 유한요소 모델 지진응답스펙트럼이 단자유도계 지진응답스펙트럼과는 상당히 다른 거동을 나타냈다.

Taft 지진응답스펙트럼에서 단자유도계 최대가속도가 고정지반 단자유도계 최대가속도의 3-4배정도 증폭되었는데 유한요소 모델의 최대가속도는 오히려 5-20%정도 감소하였고, 고유주기를 제외한 저주기 영역에서도 상당한 감소를 보였으나, 고주기 영역에서는 단자유도계와 유한요소 모델이 비슷한 경향을 보였다. 또한 El Centro 지진응답스펙트럼에서도 단자유도계 최대가속도가 고정지반 단자유도계 최대가속도의 3-7배정도 증폭되었는데 유한요소 모델의 최대가속도는 오히려 20-40%정도 감소하였고, 고유주기를 제외한 저주기 영역에서도 상당한 감소를 보였으나, 고주기 영역에서는 단자유도계와 유한요소 모델이 비슷한 경향을 보였다. 이러한 벽식아파트의 지진거동은 지진의 크기, 지반의 강성과 상관없이 고층일때는 골조형식 구조물과 유사하게 휨 거동으로 비슷한 지진응답가속도를 보이지만 중·저층일 때는 벽식구조 아파트의 큰 강성과 연약지반의 절연효과때문에 거의 강체 거동을 보이고 지반깊이가 깊을수록 최대응답가속도가 단자유도계 최대응답가속도보다 더 크게 감소하는 것으로 판단되었다.

5.2 파일기초 영향 비교

그림 7, 8에는 S_E 지반의 기초지반강성과 파일기초지반강성을 고려한 벽식구조 아파트의 유한요소 모델에 대한 Taft와 El Centro 지진응답스펙트럼이 나타나 있다. 파일기초지반강성을 고려한 유한요소 모델의 최대응답가속도가 중진과 강진 모두 비슷하게 S_E 지반의 기초지반강성을 고려한 경우보다 약간 크게 나타났는데, 이는 파일기초지반강성을 고려할 경우 기초지반강성이 커져 지진응답가속도가 커지기 때문인 것으로 판단되었다.

5.3 UBC-97 설계응답스펙트럼과 비교

그림 9에서는 기초지반깊이 10m와 30m인 S_D 지반 위에 세워진 아파트의 단자유도계와 유한요소 모델의 Taft 지진응답스펙트럼을 UBC-97 설계응답스펙트럼과 비교하였다.

단자유도계 모델의 지진응답은 고유주기 영역에서 UBC-97 설계응답스펙트럼보다 3.5배정도의 증폭을 보이는 것을 제외하고는 전반적으로 약간 작은 응답을 보였으나, 유한요소 모델의 경우는 고유주기를 제외한 저주기 영역에서 UBC-97 설계응답스펙트럼의 40-50%정도 지진응답을 보였으며, 고주기 영역에서는 UBC 지진응답의 30-50%정도로 나타났다.

그림 10에서는 기초지반깊이 10m와 30m S_D 지반 위에 세워진 아파트의 단자유도계와 유한요소 모델의 El Centro 지진응답스펙트럼을 UBC-97 설계응답스펙트럼과 비교하였다.

단자유도계 모델의 지진응답은 고유주기 영역에서 UBC-

97 설계응답스펙트럼보다 3-6배정도의 큰 증폭을 보였으나, 유한요소 모델의 지진응답은 고유주기를 포함한 중, 저주기 영역에서 UBC-97 설계응답스펙트럼의 40-90%정도 지진응답을 보였고, 고주기 영역에서도 매우 작게 나타났다.

따라서 연약지반 위에 세워진 벽식구조 아파트의 내진설계시 UBC-97의 설계응답스펙트럼을 적용하는 것은 너무 보수적이어서 안전성 측면에서는 유익하지만 경제적인 측면에서는 불리한 것으로 판단되었다.

6. 결 론

연약지반의 기초지반강성을 고려한 벽식구조 아파트의 지진응답에 대한 연구를 중진과 강진에 해당하는 1952년 Taft E-W 지진기록과 1940년 El Centro N-S 지진기록으로 SAP2000 유한요소해석 프로그램을 사용하여 시간영역에서 수행하고, 단자유도계 지진응답 및 UBC-97 설계응답스펙트럼과 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

기초지반강성은 등가정적강성을 이용하여 일반적으로 고려하고 있는 수평방향 강성만을 입력하는 것보다 수평 및 수직 방향 강성을 모두 기초저면에 균등하게 입력하는 것이 벽식구조 아파트의 지진거동을 더 정확하게 파악할 수 있는 것으로 판단되었다.

벽식구조 아파트의 지진거동이 고층일 때는 골조형식 구조물과 유사한 거동을 보이지만 중, 저층일 때는 벽식구조의 큰 강성과 연약지반의 절연효과때문에 거의 강체거동을 보이고, 기초지반깊이가 깊을 수록 지진응답스펙트럼이 더 크게 감소하는 것으로 판단되었다.

깊은 연약지반 위에 세워진 중, 저층 벽식구조 아파트의 지진응답스펙트럼은 강체거동으로 상당히 감소되므로 내진설계시 UBC-97 설계응답스펙트럼을 적용하는 것은 보수적 설계로 안전성은 양호하지만 경제성은 크게 떨어지기 때문에, 연약지반 위에 세워진 벽식아파트 설계에 적합한 응답스펙트럼 개발이 필요한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. International Conference of Building Officials, *Uniform Building Code*, California, USA, 1997.
2. 강호근, 박성수, 조한욱, 전대한, "동적 탄소성 지진응답해석에 의한 고층벽식 아파트의 내진성능 검토", 한국지진공학회논문집, 제3권, 제1호, 1999, pp. 1-8.
3. 김용석, "반지하구조물 내진설계를 위한 지반거동", 전산구조공학회논문집, 제1권, 제2호, 1988, pp. 91-100.
4. 한국지진공학회, 구조물의 지진해석, 기술강습회 교재, 한국지진공학회, 1999, p. 256.
5. 김용석, "구조물 내진설계를 위한 기초지반체계 동특성에 관한 연구", 한국지진공학회논문집, 제1권, 제3호, 1997, pp. 1-10.

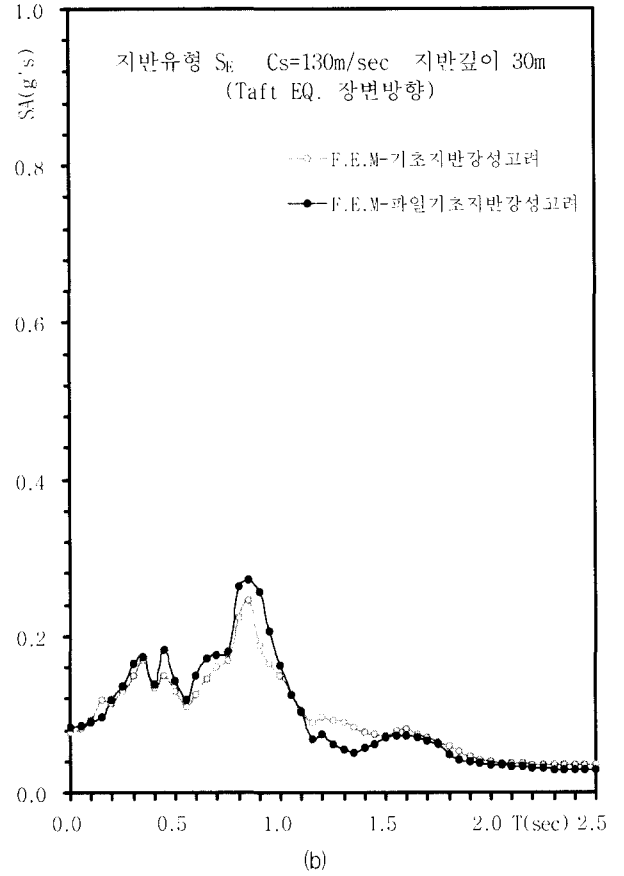
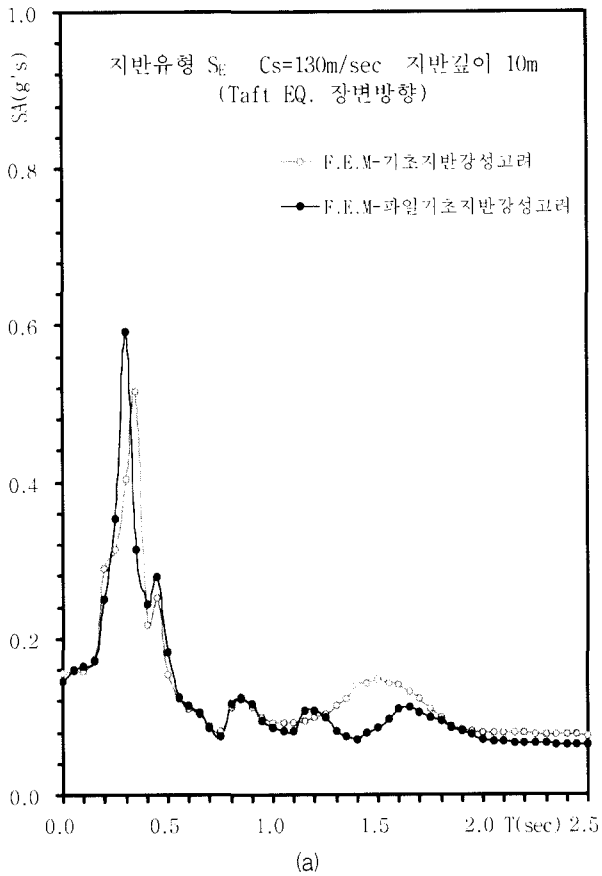


그림 7 지반깊이 10m와 30m인 파일기초지반강성을 고려한 Taft 지진응답스펙트럼

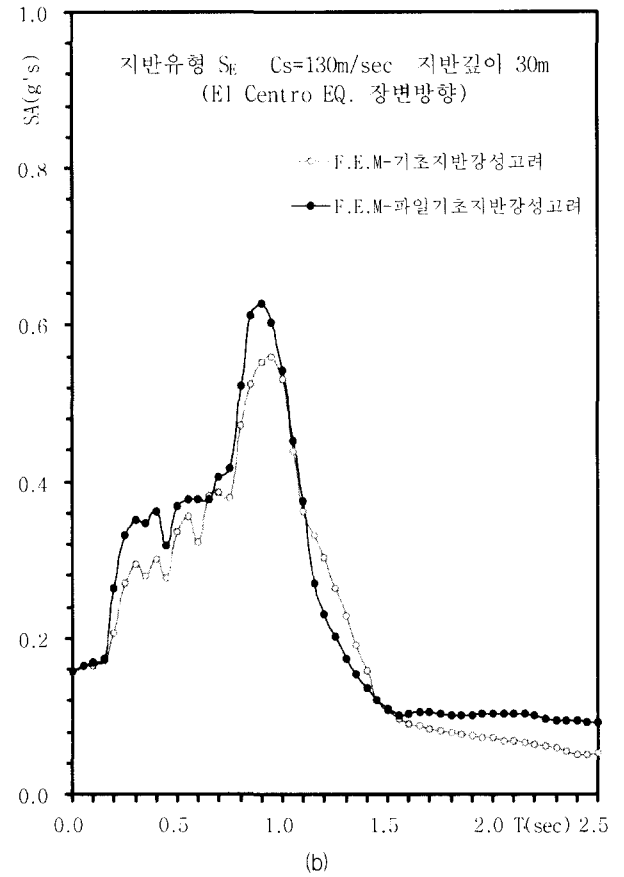
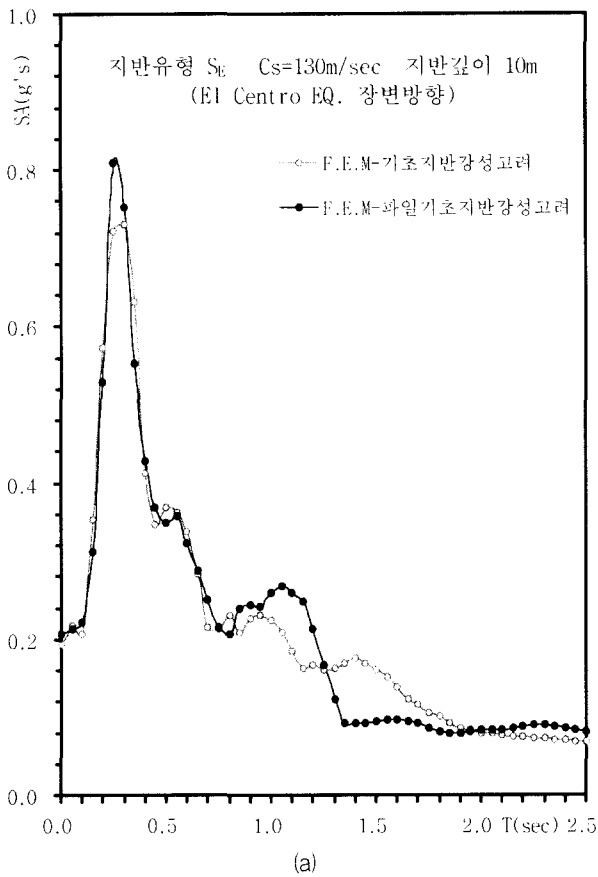


그림 8 지반깊이 10m와 30m인 파일기초지반강성을 고려한 El Centro 지진응답스펙트럼

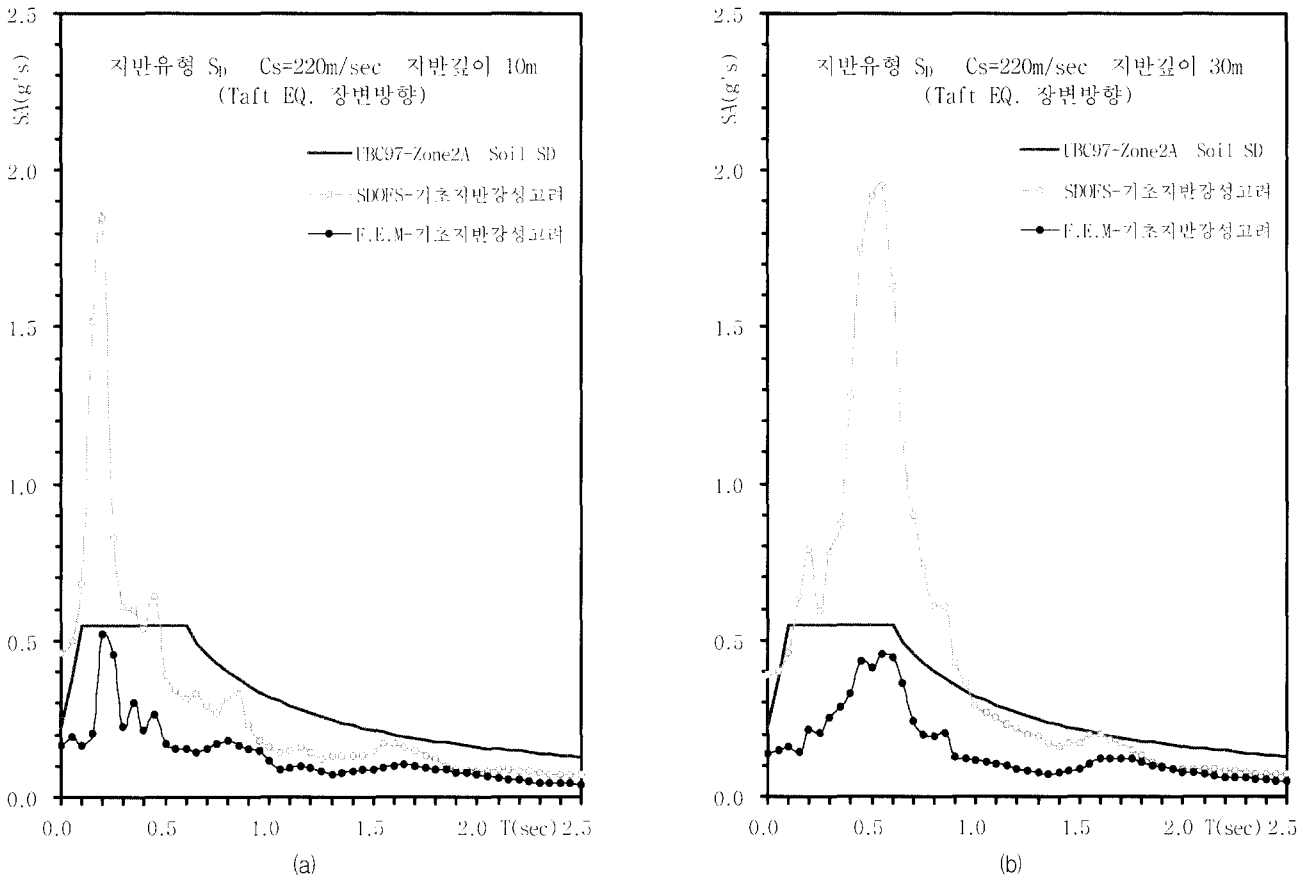


그림 9 설계응답스펙트럼과 10m와 30m S_D 지반 위에 세워진 아파트 Taft 지진응답스펙트럼

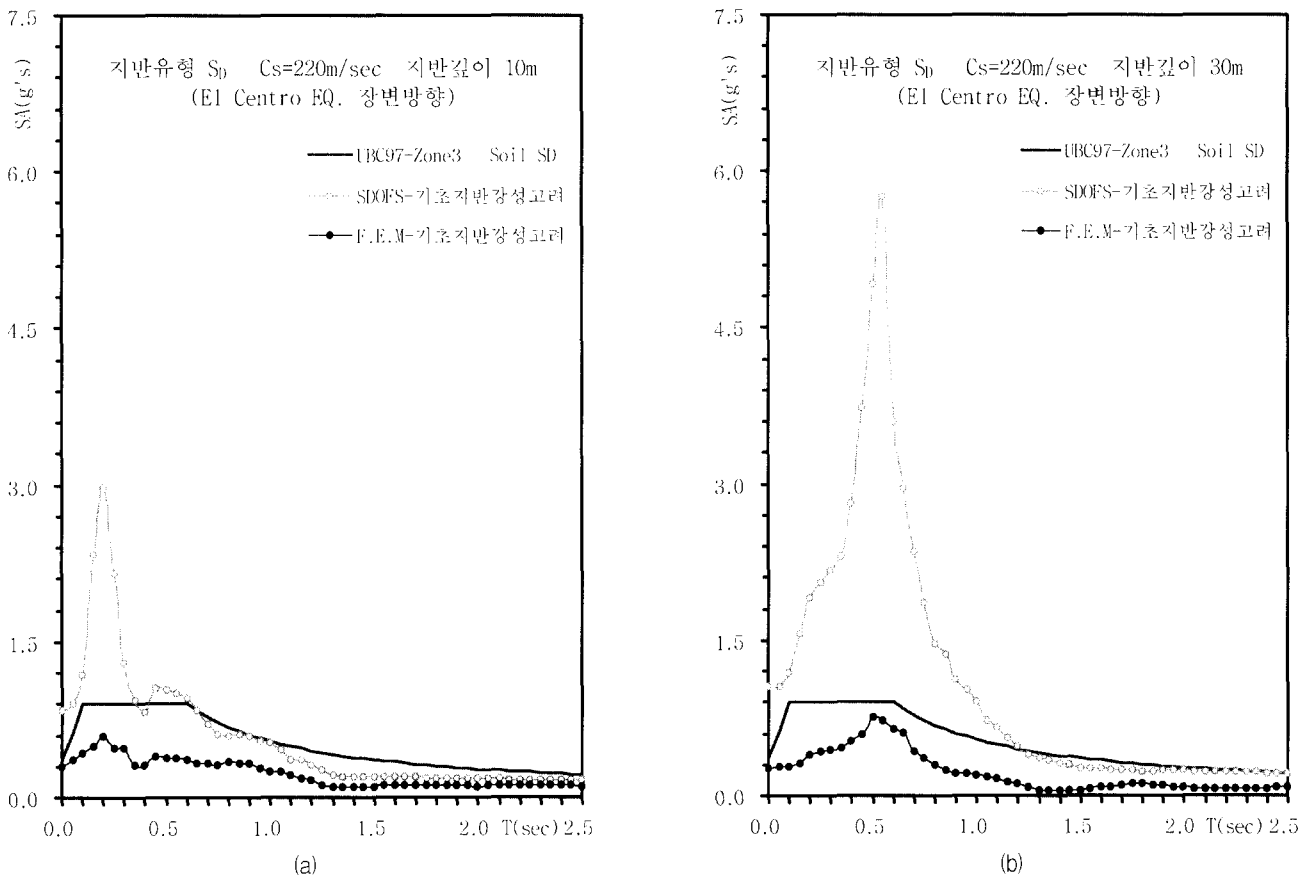


그림 10 설계응답스펙트럼과 10m와 30m S_D 지반 위에 세워진 아파트 El Centro 지진응답스펙트럼

6. Kim, Y. S., "Effect of Embedment on Seismic Motion of Buildings," M.S. Thesis, The University of Texas at Austin, 1984.
7. CSI, *SAP2000 Analysis Reference*, Vol. 1-2, 1997.
8. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, 1993, pp. 738.
9. 김용석, "UBC-97에 분류된 깊은 지반위에 세워진 구조물의 지진응답 스펙트럼에 관한 연구", 한국지진공학회논문집, 제4권, 제1호, 2000, pp. 63-75.