

## 낮은 심도의 연약지반에 대한 비선형 지진응답해석

### Nonlinear Seismic Response Analysis for Shallow Soft Soil Deposits

박홍근<sup>1)</sup> · 김동관<sup>2)</sup> · 이경구<sup>3)</sup> · 김동수<sup>4)</sup>

Park, Hong Gun · Kim, Dong Kwan · Lee, Kyung koo · Kim, Dong Soo

**국문 요약** >> 본 연구에서는 얇은 연약지반에서 구조물-지반 상호작용의 영향을 받는 구조물의 비탄성거동을 정확히 나타낼 수 있는 유한요소해석 방법을 연구하였다. 이를 위하여, 국내의 지반특성을 반영한 얇은 연약지반과 단자유도 구조물로 2차원 유한요소모델을 구성하고, 다양한 지진파와 지반에 대해 OpenSees 해석프로그램을 이용한 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 연약지반의 비선형거동을 반영하기 위하여 일반적으로 흔히 사용되는 등가선형 주파수영역 해석 결과와 비선형 시간이력 유한요소해석 결과의 차이를 검토하였다. 그 비교결과는 등가선형강성을 사용하고 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않는 주파수영역해석은 단주기영역의 구조물의 응답스펙트럼을 과대평가할 수 있음을 보여주었다. 응답스펙트럼에 대한 지반-구조물 상호작용의 영향은 기초크기와 구조물의 질량의 변화와 큰 관계 없이 일정하게 나타났다.

**주요어** 유한요소해석, 지반-구조물 상호작용, 응답스펙트럼, 연약지반, 시간영역해석

**ABSTRACT** >> This study presents a finite element analysis method that can accurately evaluate the nonlinear behaviour of structures affected by shallow soft subsoils and the soil-structure interaction. A two-dimensional finite element model that consists of a structure and shallow soft subsoil was used. The finite element model was used for a nonlinear time domain analysis of the OpenSees program. A parametric study was performed to investigate the effects of soil shear velocities, earthquake input motions, soft soil depth, and soil-structure interaction. The result of the proposed nonlinear finite element analysis method was compared with the result of an existing frequency domain analysis method, which is frequently used for addressing nonlinear soil behavior. The result showed that the frequency domain analysis, which uses equivalent secant soil stiffness and does not address the soil-structure interaction, significantly overestimated the response of the structures with short dynamic periods. The effect of the soil-structure interaction on the response spectrum did not significantly vary with the foundation dimensions and structure mass.

**Key words** Finite element analysis, Soil-structure interaction, Response spectrum, Soft soil, Time domain analysis

## 1. 서론

최근 국내에서는 대지의 부족과 해안 신도시건설의 증가로 인하여 연약지반에 고층건물의 건축이 증가 되고 있다. 현 건축구조설계기준(KBC2009)<sup>(1)</sup>에 따르면, 연약지반에 의하여 지진하중이 크게 증폭되며, 따라서 고층건축물의 구조설계에서 지진하중이 주요한 설계 변수로 작용하고 있다.

현재, 건축구조설계기준(KBC2009)<sup>(1)</sup>에서는 연약지반인 경우 지진하중의 크기를 정의하는 설계가속도스펙트럼을 크게 증폭하도록 규정하고 있으며, 이 증폭계수는 미국 IBC(International Building Code) 2006<sup>(2)</sup>를 참고로 하여 결정하였다. 그러나 IBC2006<sup>(2)</sup> 기준은 연약층의 깊이가 100~300m인 캘리포니아 지역에서 실측된 지반운동(Loma Prieta)을 기반으로 하고 있는 반면<sup>(3)</sup>, 국내의 경우 연약지반의 깊이가 최대 30-50m로서 IBC2006의 지반계수를 그대로 적용하는 것은 국내지반의 상황에 적합하지 않다.

윤종구 등<sup>(4-6)</sup>은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 실측된 국내 162개 지반을 대상으로 등가선형 주파수영역해석 연구를 수행하여, 국내지반특성을 고려한 설계응답스펙트럼 개선방법을 제시하였다. 연구결과에 따르면 낮은 심도의 연약지반에서는 기존기준에 비하여 단주기구조물에서는 더

<sup>1)</sup> 정희원·서울대학교 건축학과 교수

(교신저자: parkhg@snu.ac.kr)

<sup>2)</sup> 정희원·서울대학교 건축학과 박사과정

<sup>3)</sup> 정희원·단국대학교 건축공학과 전임강사

<sup>4)</sup> 정희원·한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 10. 13 / 수정일 1차 : 2010. 6. 10, 2차 : 2010. 6. 19 /

게재확정일 : 2010. 6. 21)

큰 증폭이 나타나고, 장주기구조물에서는 작은 증폭이 나타나는 증폭의 경향이 매우 달라지는 결과가 도출되었다. 또한 KBC2009에서도 이러한 연약지반의 특성을 지진하중의 결정에 직접 반영할 수 있도록, 지반상세해석의 사용을 허용하고 있다. 따라서, 구조물의 지진응답에 대한 얇은 연약지반의 영향을 고려할 수 있는 신뢰성 있는 해석방법과 해석모델의 사용이 요구되고 있다.

지반에 대한 해석방법으로서 주로 1차원 등가선형 주파수영역 해석방법(SHAKE<sup>(7)</sup>)이 사용되고 있다. 이 해석방법에서는 무한한 크기의 지반을 대상으로 등가선형해석이 수행된다. 비선형 지반에 대해서는 주파수에 따른 전단변형률(shear strain)의 변화를 고려하여 유효전단변형률에 해당하는 활선전단강성을 사용하는 등가선형해석을 이용하여 근사해를 구한다. 그러나, 기존연구에 따르면(Yoshida et al<sup>(8)</sup> 박두희 등<sup>(9)</sup>), 이러한 등가선형 주파수영역 해석은 지반의 비탄성변형의 정도에 따라서 지반의 강성이 지속적으로 변화하는 실제 비선형거동을 정확히 나타내지 못한다.

Kim et al<sup>(10)</sup>의 연구에 따르면, 연약지반에서는 지반-구조물의 상호작용에 의하여 구조물의 주기가 증가되거나 지반의 에너지소산이 증가한다. 이러한 지반-구조물 상호작용을 고려하기 위하여, 기존의 대부분의 연구는 지반과 구조물을 분리하여 고려한 부구조물해석법(Substructure Method)이 적용되어왔다. 그러나, 암반이 낮은 심도에서 존재하는 경우에는 연약지반의 자유장운동과 지반-구조물 상호작용을 명확히 분리할 수 없으므로, 부구조물해석방법보다는 지반과 구조물의 전체모델에 대하여 해석을 수행하는 직접해석방법(Direct Method)이 적합하다.

본 연구에서는 국내지반환경을 고려하여 얇은 연약지반에 대한 비선형해석방법에 대한 연구를 수행하였다. 지반의 비선형거동에 의한 강성의 변화를 정확히 나타내고, 지반-

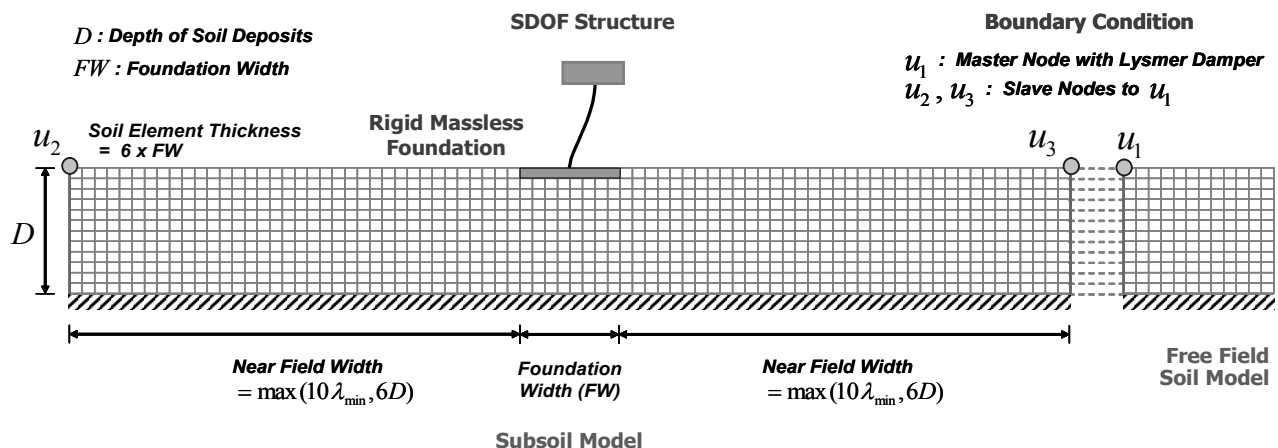
구조물 상호작용을 직접 반영하기 위하여 원역지반과 근역지반의 영향을 동시에 모사할 수 있는 비선형 시간이력 유한요소해석을 사용하였다. 제안된 해석방법을 상세히 기술하고, 기존의 SHAKE 의 해석결과와의 비교를 통하여 주파수 영역해석과의 차이점을 분석하였다. 또한 연약지반에서 응답스펙트럼에 미치는 주요변수의 영향을 연구하였다.

## 2. 유한요소모델

본 연구에서는 시간이력해석을 위하여 OpenSees<sup>(11)</sup> 유한요소해석 프로그램을 사용하였다. 지반-구조물 상호작용과 대규모 연약지반에 의한 지반효과를 동시에 고려하기 위하여 본 연구에서 제안하는 해석모델은 그림 1에 나타난 바와 같이 하부지반모델(Subsoil Model), 자유장지반모델(Free Field Soil Model), 구조물 등 세 가지 모델로 구성되었다. 하부지반모델은 지반-구조물 상호작용거동을 나타내기 위하여 사용되었으며, 자유장지반모델은 지반-구조물 상호작용의 영향을 받지 않는 연약지반 고유의 동적운동특성을 나타내기 위하여 사용되었다. 하부지반모델의 좌우 경계는 자유장지반모델과 연결되어 동일한 지반움직임을 나타내도록 변위가 제어 되었다. ( $u_2, u_3 = u_1$ , 그림 1)

### 2.1 지반 및 구조물 모델

하부지반모델(Subsoil Model)에서는 구조물 주위에서 발생하는 국부적인 지반-구조물 상호작용의 영향을 고려할 수 있도록 구조물하부에 연약지반이 모델링 되었다. 지반의 3차원 거동은 평면모델로 이상화 할 때 평면변형률(Plane Strain) 상태의 거동을 나타낸다. 따라서, 지반모델을 위하여 2차원 4절점의 사각형 평면변형률 요소(Quadrilateral Plane Strain Element)를 사용하였다. 유한요소의 최대 크기는 가능한 최



〈그림 1〉 변수 해석연구를 위한 2차원 지반-구조물 합성모델

대주파수를 전달할 수 있도록, 최대주파수( $f_{max}$ )를 25Hz로 설정하여 유한요소의 최대 폭( $\Delta h$ )이 다음과 같이 결정되었다. (PEER<sup>(12)</sup>)

$$f_{max} = 25_{HZ} \leq \frac{1}{T} = \frac{V_s}{4 \Delta h} \quad (1)$$

여기서  $V_s$  는 지반의 전단파 속도이다. 식 (1)에 의하면, 유한요소 하나의 최대 폭( $\Delta h$ )은 전단파속도의 1/100배로 결정된다. 또한 이는 Jerimic et al.<sup>(13)</sup> 의 연구에서 식 (2)와 같이 일반적인 지진해석에서 입력지진파의 최대주파수( $f_{max}$ )가 10Hz인 경우에, 식 (3)과 같이 최소파장( $\lambda_{min}$ )의 1/10 값을 유한요소의 최대 폭으로 산정한 결과와 동일하다.

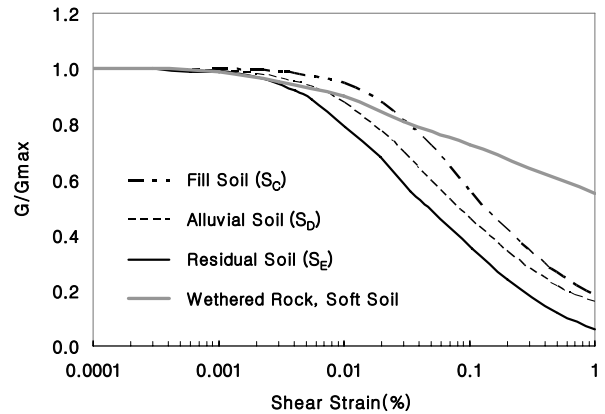
$$\lambda_{min} \leq \frac{V_s}{f_{max} (= 10_{HZ})} \quad (2)$$

$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{min}}{10} = \frac{V_s}{100} \quad (3)$$

본 연구에서는 유한요소의 최대폭을 2m 이하로 정하였다. 구조물을 중심으로 하부지반모델의 길이는 최소파장( $\lambda_{min}$ )의 10배의 값과 지반깊이의 6배의 값 중 큰 값을 선택하여 충분히 큰 규모의 인접지반을 모델링하였다.(그림 1)

자유장지반모델(Free-field Soil Model)은 하부지반모델의 지반-구조물 상호작용의 영향을 받지 않도록 대규모 크기의 지반으로 모델링되었다. 자유장지반모델의 측면경계조건으로서, 지진동시 자유장지반의 움직임에 반사파를 유발시키지 않고 흡수할 수 있는 Lysmer 점성감쇠를 적용하여, 반무한체를 구현함으로써 자유장거동(Free-field Motion)을 나타내도록 하였다.<sup>(14)</sup> 언급한 바와 같이 연약지반의 고유지반운동이 구조물 하부지반모델의 경계에 영향을 미치도록, 자유장지반모델의 절점( $u_1$ )의 움직임에 따라 하부지반모델의 경계의 절점들( $u_2, u_3$ )이 제어되도록 하였다. 본 연구는 지반의 비선형거동의 특성을 파악하는데 중점을 두었으므로, 지반종류의 영향을 단순화하고자 지반모델을 한가지의 지반종류로 모델링하였다.

시간이력해석을 위하여 직접 수치적분법을 이용한 재료 비선형해석기법 적용하였다. OpenSees에서 전단탄성계수 감소곡선을 정의할 수 있는 Pressure-Independent material model을 사용하였으며, 김동수 등<sup>(15)</sup>의 연구에서 그림 2과 같이 제안한 국내지반에 적합한 전단탄성계수 감소곡선을 적용하여 지반의 비선형성을 구현하였다. 지반의 비선형성은 토질의 종류와 강성에 따라 다양한 곡선으로 정의될 수



〈그림 2〉 지반의 전단탄성계수 감소곡선<sup>(15)</sup>

있는데, 본 연구에서는 지반분류  $S_C, S_D, S_E$  에 해당하는 각 지반을 그림 2와 같이 전단탄성계수 감소곡선에 적용하여 해석연구를 수행하였다. 지반에 대한 감쇠로는 Rayleigh 점성감쇠를 적용하였으며, 감쇠계수가 고정되어 있는 선형감쇠가 아닌 지반의 비선형성에 의해 변화하는 강성에 따라 감쇠가 변화하도록 적용하였다.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (4)$$

여기서 질량비계감쇠계수  $a_0$ 와 강성비례감쇠계수  $a_1$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (5)$$

$$a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (6)$$

$\omega_i$ 는 지반의 고유주기에 상응하는 주파수( $f_1$ )로부터 계산하며,  $\omega_j$ 는  $5f_1$ 의 값으로부터 산정하였다.(PEER<sup>(12)</sup>) 이 때의 감쇠비  $\xi=5\%$ 를 적용하였다.

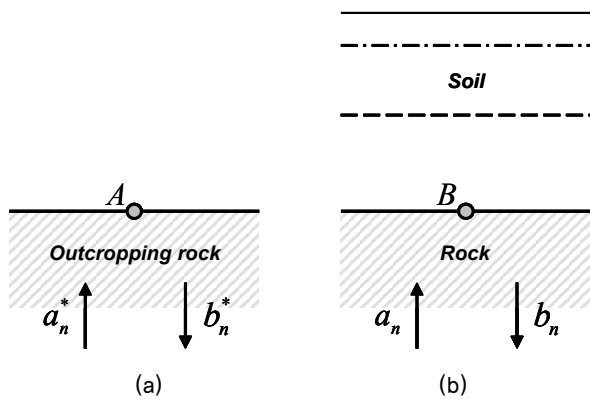
구조물은 전단변형의 단자유도(SDF) 모델로서 5% damping을 적용하였으며, 응답스펙트럼해석을 위하여 0.01초에서 3.0초까지 0.05초 간격으로 고유주기를 갖는 단자유도 구조물들을 사용하였다.

## 2.2 입력지진

대부분의 기록된 지진이력은 암반노두(Outcropping Rock)에서의 지진가속도를 기록한 것이다. 그림 3-(a) 암반노두의 표면 A점에서 기록된 지진가속도(Outcropping-motion)는 노출면의 영향으로 입사파가 하향파로 반사될 때, 반사가 이루어지며 따라서 상향파(Upward Traveling Wave)와 하향

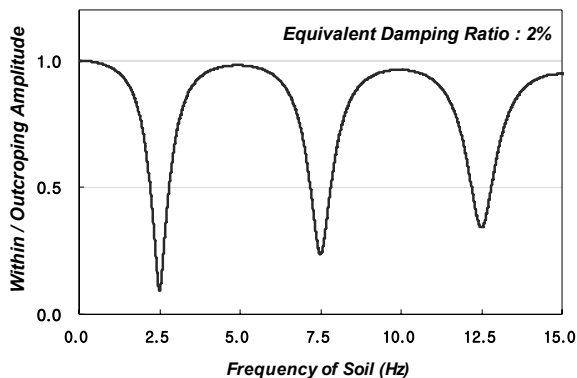
파(Downward Traveling Wave)가 겹치게 되며, 이로 인하여 입사파와 반사파 간의 중첩이 발생하여 입사파만의 진폭의 2배가 증폭되어 기록된다.

반면에 그림 3-(b)와 같이 실제로 기반암 위에 지반이 있는 경우에는 상부 연약지반의 영향으로 인하여, 입사파의 완전반사가 발생하지 않으며, 이때 상부 연약지반이 있는 기반암(B)에서 측정된 가속도기록을 Within-motion 이라고 한다. 그러므로 본 연구와 같이 연약지반을 유한요소로 모델링하고, 하부 연암층을 고정단 경계조건으로 하여 시간이력해석을 하는 경우에는 암반노두에서 기록된 Outcropping-motion을 연약지반과 기반암 사이의 Within-motion으로 변환시켜야 한다.<sup>(16)</sup> 따라서, 본 연구에서는, 그림 1의 해석 모델에서 연약지반의 하단부에서의 기반암 가속도로 사용하기 위하여 이 암반노두에서 측정된 지진가속도를 기반암 위치에서의 가속도로 변환시켜 사용하였다.



$a_n^*$  = 암반노두의 입사파  
 $a_n$  = 연약지반 하부의 입사파,  $a_n^* = a_n$   
 $b_n^*$  = 암반노두의 반사파  
 $b_n$  = 연약지반 하부의 반사파,  $b_n^* \neq b_n$

〈그림 3〉 입력지진파의 변환<sup>(16)</sup>



$V_s = 300\text{m/sec}$ , Depth = 30m,  $T_1 = 0.4\text{sec}$ ,  $f_1 = 2.5\text{Hz}$

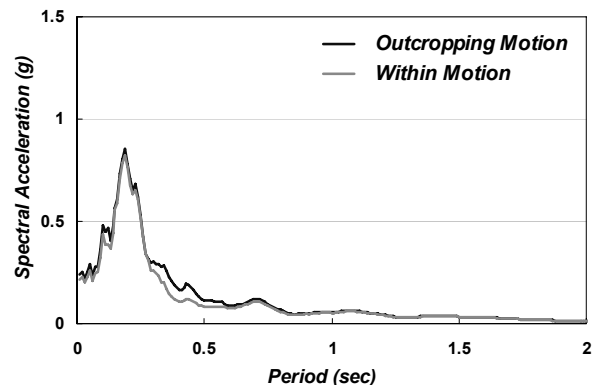
〈그림 4〉 지반주파수에 따른 outcropping motion 대 within-motion의 가속도 진폭의 비

예를 들어, 전단파속도  $V_s = 300\text{ m/s}$ 이고, 연약층 깊이가 30m인 지반 ( $T_1 = 0.4\text{ sec}$ )에 대하여 전달함수(Transfer Function)를 토대로 변환된 연약지반하부 Within-motion과 Outcropping-motion의 주파수영역에서 가속도의 진폭의 비는 그림 4와 같다. 유한요소해석모델의 연약지반하부에 입력될 가속도 기록은 Outcropping-motion의 가속도 기록을 전달함수에 따라 연약지반의 고유진동수를 기준으로 그림 4와 같은 감소계수를 곱하여 산정하였다. 이때의 전달함수(Transfer Function)는 상부연약지반의 특성을 반영하는 각속도( $\omega$ )와 하부 연암의 특성에 의해 결정되며, 본 연구에서는 하부지반모델과 자유장지반모델의 하부는 연암층 ( $V_s = 1000\text{ m/s}$ )으로 가정하고, 상부지반과 하부연암층의 초기 감쇠비는 2%로 가정하여 입력지진파를 변환하였다. 이와 같이 변환된 입력지진파는 동일한 알고리즘을 적용한 SHAKE의 outcrop option에 의해 산정된 입력지진파와 동일하다.

그림 5는 Northridge(1994) 지진파의 Outcropping-motion에 의한 응답스펙트럼과 이를 Within-motion으로 변환시킨 지진파에 대한 응답스펙트럼을 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 차이가 크지 않지만 Within-motion에 의한 응답스펙트럼이 Outcropping-motion에 의한 응답스펙트럼보다 작음을 알 수 있다.

### 3. 해석변수

본 연구에서는 낮은 심도의 연약지반의 영향을 받는 구조물의 진동응답과 응답스펙트럼을 위한 해석방법의 적합성을 조사하기 위하여 다음 두 가지 연구를 수행하였다. 1) 연약지반의 자유장 지표면의 비선형응답으로서, 등가선형 주파수해석을 사용하는 SHAKE 프로그램의 해석결과와 비선형 유한요소해석을 사용하는 OpenSees 프로그램의 해석결



〈그림 5〉 within-motion으로 변환된 Northridge(1994) 지진파에 대한 응답스펙트럼

과와 비교하였다. 2) 지반-구조물 상호작용의 영향을 파악하기 위하여 하부지반위에 위치한 구조물의 응답을 해석하여 1)에서 구한 지반 자유장 지표면의 응답과 비교 하였으며, 지반-구조물 상호작용에 대한 변수의 영향을 연구하였다.

### 3.1 해석방법

본 연구에서는 다음 3가지 해석방법을 사용하였다.

#### 3.1.1 등가비선형 주파수 영역해석 (SHAKE)

보편적으로 사용되는 SHAKE 프로그램을 사용하였다. 비선형지반거동을 나타내기 위하여 등가강성(할선강성)을 사용하며, 지반-구조물 상호작용을 직접 고려할 수 없다. 구조물의 응답스펙트럼을 작성하기 위하여 분리해석을 수행한다. 즉, 연약층에 대하여 등가선형 주파수영역해석을 수행하여, 자유장 지표면(Free-Field surface)에서 연약층에 의해 증폭된 가속도를 산정하며, 이 증폭된 자유장 지표면 가속도를 단자유도 구조물의 운동방정식에 적용하고, 구조물의 주기를 변화시켜 산정한 결과로부터 응답스펙트럼을 구한다. 구조물의 damping은 5%로 가정하였다.

#### 3.1.2 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 비선형 시간이력유한요소해석(OpenSees without SSI)

그림 1의 자유장지반모델(Free-field Soil Model)의 지표면에서의 지진가속도를 측정한다. 이는 증폭된 자유장 지표면 가속도와 같으며, 이 결과를 이용하여 단자유도 구조물들에 대한 응답스펙트럼을 작성한다. 이는 SHAKE에서 사용하는 분리해석방법과 동일하고, 지반-구조물 상호작용이 적용되지 않는다.

#### 3.1.3 지반-구조물 상호작용을 고려한 비선형 시간이력유한요소해석(OpenSees with SSI)

구조물에 작용하는 지진하중을 나타내는 응답스펙트럼을 직접 도출하기 위하여 그림 1의 하부지반모델 위 구조물의 밀면전단력으로부터 직접 pseudo-acceleration을 산정한다. 구조물의 주기를 변화시키면서 변화된 지반-구조물모델들에 대하여 시간이력해석을 수행하여 산정된 결과들로부터 응답스펙트럼을 작성한다. 이 응답스펙트럼은 지반-구조물 상호작용 효과가 반영된 결과이다.

### 3.2 지반특성

KBC 2009에서 규정된 연약지반의 종류를 사용하였다.

〈표 1〉 지반의 분류<sup>6)</sup>

지반 기호	지반 종류	전단파 속도 Vs(m/s)
SA	경암지반	1500 초과
SB	보통암지반	760 ~ 1500
SC	매우 조밀한 토사지반 또는 연암	360~760
SD	단단한 토사지반	180~360
SE	연약한 토사지반	180 미만

〈표 2〉 변수연구에 사용된 지진이력

Events	M	Stations	PGA(g)
Morgan Hill,1984	6.2	47379 Gilroy Array #1	0.069
Hollister,1974	5.2	Gilroy Array #1	0.132
Northridge,1994	6.7	Mt Wilson-CIT Seis Sta	0.234

표 1과 같이 지반분류의 기준이 되는 전단파속도의 범위에서 Sc ~ Se 지반의 전단파속도구간( $100\text{m/s} \leq V_s \leq 760\text{m/s}$ )의 지반종류에 대하여 대표적인 전단파속도를 선택하여, 150 m/s(Se), 300m/s(SD), 500m/s(Sc)의 연약지반에 대하여 해석연구를 수행하였다.

KBC 2009, IBC 2006 등의 현 설계기준에서는 지반의 깊이와 관계없이 지반의 전단강성에만 의존하여 지반을 분류한다. 그러나, 동일한 강성 및 전단파속도를 가진 지반이라도, 지반의 깊이(그림 1의 D)에 따라 연약지반의 주기가 달라지므로 그에 따른 구조물과 지반의 지진응답이 다르게 나타날 수 있다. 연약지반깊이의 영향을 고려하기 위하여 15m, 30m, 50m, 100m의 깊이를 고려하였다.

해석연구에 사용된 지진기록은 김용석<sup>(17)</sup>의 연구에서 분석되어 선정된 26개의 암반지진기록에서 표 2에 나타난 3가지의 지진파를 적용하였다. 각각은 PGA에 따른 약진, 중진, 강진의 지진특성을 가지고 있다. 이러한 다양한 지반가속도를 사용함으로써, 비선형 지반의 전단강성의 변화에 대한 등가선형해석법과 시간이력비선형해석법의 차이를 연구하였다.

### 3.3 구조물의 질량과 기초의 크기

지반-구조물 상호작용은 구조물의 주기, 지반의 특성 뿐만 아니라 구조물의 질량과 기초의 크기에 따라서 달라질 수 있다. FEMA 440<sup>(18)</sup>와 Veletsos et al.<sup>(19)</sup>의 연구에서 따르면, 지반의 파장에 대하여 상대적으로 기초판의 크기가 증가하면, 기초판운동의 진폭이 자유장운동에 비해 감소된다. 따라서 본 변수 연구에서는 기초판의 크기를 지반의 파장에 대한 비율 0.1λ, 0.2λ, 0.4λ, 0.6λ, 0.8λ, 1.0λ로 정의하였

다. 여기서  $\lambda$ 는 지반의 파장으로서  $\lambda = 2\pi V_s / \omega$ 에 의하여 계산된다. ( $\omega$  = 각속도)

일반적으로 모멘트골조 건축물의 단위질량( $\rho$ )은 대략적으로  $0.25\text{ton/m}^3$ 이다. 단위질량의 변화를 고려하기 위하여 0.1, 0.2, 0.3, 0.4,  $0.5\text{ton/m}^3$ 을 고려하였다. 구조물의 전체 질량은 해당 주기의 10배로 가정된 층수에 층고 4.2m와 기초판의 크기를 곱하여 구조물의 전체질량( $M$ )을 정하며, 구조물의 유효높이를 고려하여 전체질량의 3/4 값을 단자유도 등가구조물의 질량으로 정하였다.<sup>(20)</sup>

### 4. 자유장 해석결과

#### 4.1 선형 지반 거동

선형탄성지반을 가정하고 SHAKE를 이용한 선형 주파수 영역 해석(방법 A)에 의한 응답스펙트럼과 OpenSees 프로그램을 이용한 선형 시간영역 해석(방법 B)에 의한 응답스펙트럼을 비교하였다. 그 결과는 그림 6에 나타나 있으며, 지반에 대한 조건은 그림에 주어져 있다. 그림에 나타난 바와 같이 두 해석방법에 의한 응답스펙트럼은 거의 일치하였다. 이 결과는 제안된 모델에 대한 선형 시간이력 유한요소해석이

지반의 자유장 거동을 정확히 나타낼 수 있다는 것을 보여준다.

#### 4.2 비선형 지반 거동

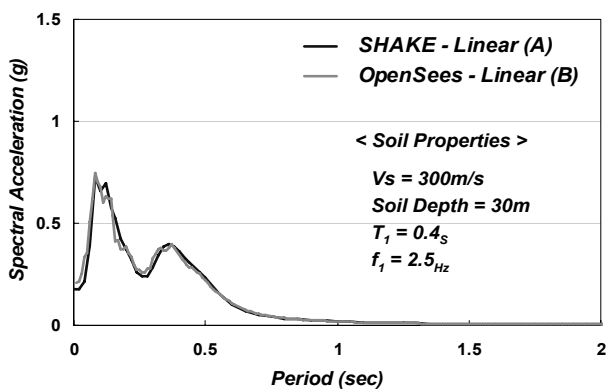
비선형지반에 대하여 2가지 해석방법, 즉, SHAKE (A)와 OpenSees without SSI (B)을 사용하여 해석하였으며, 응답스펙트럼을 비교하였다. 이 해석에서 표 2의 3개의 지진파를 사용하였고 연약지반의 깊이는 30m를 사용하였다. 지반전단파속도는 150m/s, 300m/s, 500m/s를 사용하였다.

해석에 의한 응답스펙트럼 결과는 그림 7에 나타나 있다. 탄성지반에 대한 해석결과인 그림 6과 달리, 지반의 비선형성을 고려한 SHAKE의 해석결과와 OpenSees의 해석결과가 차이가 입력지진파의 크기 및 지반의 강성에 따라 다르게 나타난다. 비교적 지반의 강성이 큰 지반전단파속도  $V_s=500\text{m/s}$ 인 경우, SHAKE의 결과가 OpenSees의 결과와 비슷하게 나타났다. 지반의 강성이 작은  $V_s=150, 300\text{m/s}$ 의 경우에는 0.3초 이하의 주기영역을 제외하고, 전반적으로 SHAKE의 결과가 크게 나타났다.

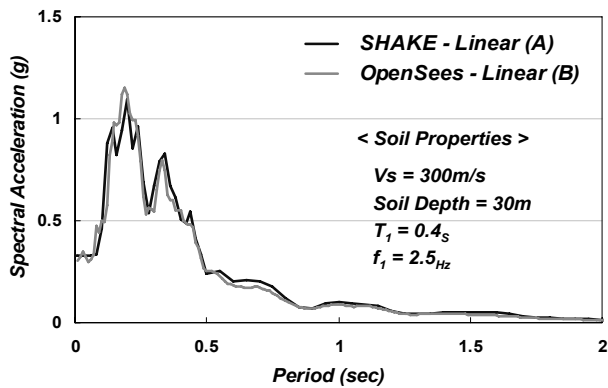
연약지반  $V_s=300\text{m/s}$ 의 경우, 두 해석방법의 차이를 분석하기 위하여 그림 8과 같이 해당지진파를 주파수영역으로 변환하여 Fourier Amplitude를 계산하였다. 등가선형해석 결과인 그림 8(a)의 경우, 원지진파의 탁월주파수에서 응답이 증폭하는 것과 동시에 유효전단변형률에 의한 할선탄성계수를 적용한 지반에서의 등가탄성주파수인 2.17Hz를 기준으로 응답의 증폭이 발생하는데 반하여, 그림 8(b)에 나타난 비선형시간이력해석의 경우에는 지반의 시간이력이 변화함에 따라서 전단탄성계수가 지속적으로 변화하며, 따라서 공진주파수대역이 시간에 따라 바뀌며, 그 결과, 그림에 나타난 바와 같이 증폭의 크기가 작게 나타난다.

등가선형 해석방법은 주파수영역에서 지반 내에 발생하는 최대전단변형률로부터 유효전단변형률을 구한 후, 이에 상응하는 전단탄성계수(할선탄성계수)와 감쇠비를 등가선형해석에 적용한다. 그러나, 실제 지반의 비탄성거동에서 나타나는 전단강성은, 등가선형해석에서 가정하는 할선탄성계수와 달리, 전단변형율의 크기에 따라서 변화한다. 즉, 실제 전단변형율이 유효전단변형율보다 작은 경우에는 등가선형해석이 강성을 과소평가하며, 반대로 실제 전단변형율이 유효전단변형율보다 큰 경우에는 강성을 과대평가한다.

따라서 그림 7(g), (h)와 같이, 지반의 강성이 크고 입력지진파의 크기가 작아서 지반거동의 비선형성이 작은 경우에는, 등가선형해석과 비선형해석의 차이가 적었지만, 그림 7(a), (b), (c), (f), (i)와 같이 지반의 강성이 작거나 지진파의 크기가 커서 비선형성이 큰 경우에는 해석결과의 차이가 크며, 등

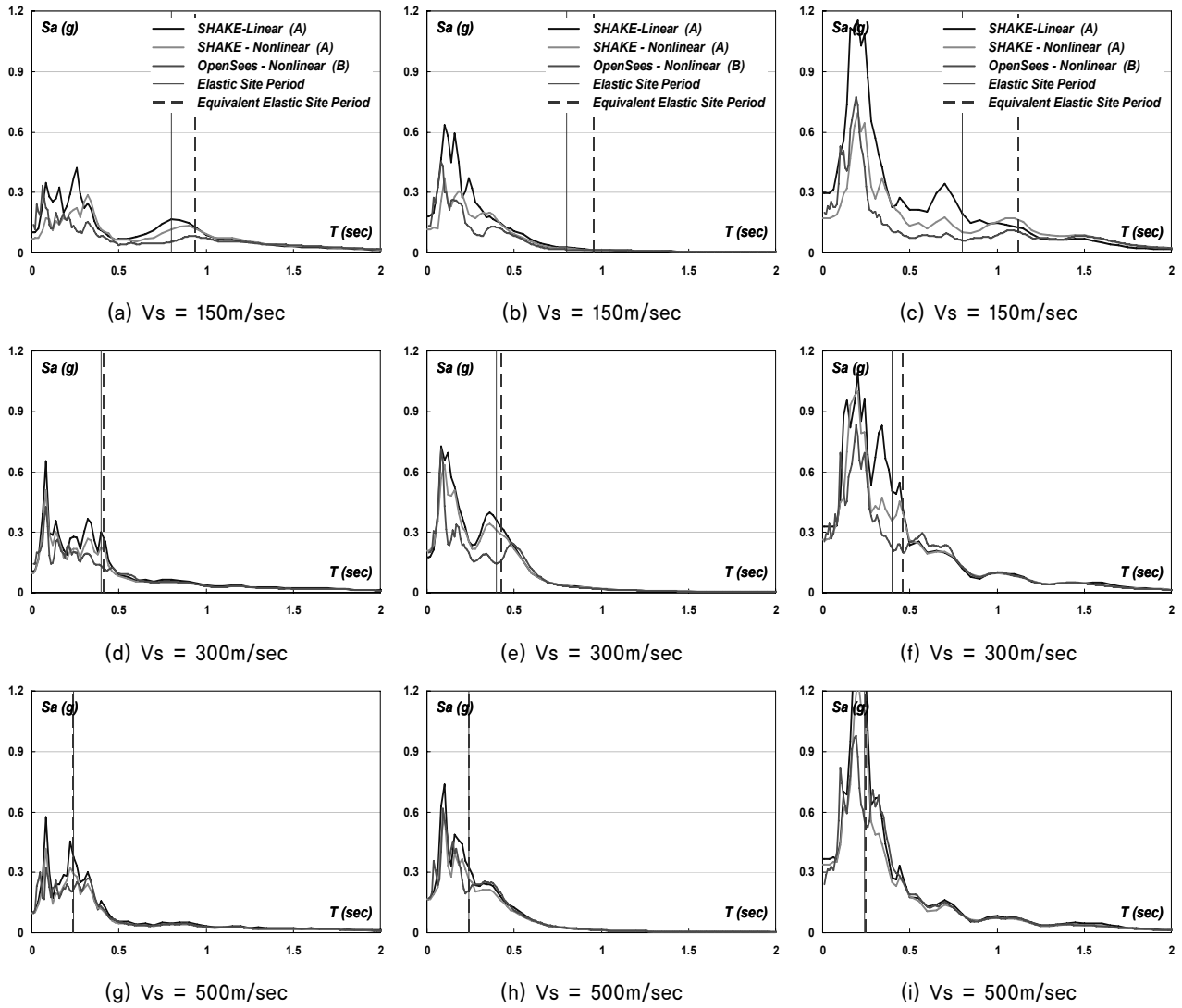


(a) Hollister(1974) 지진, PGA=0.132g



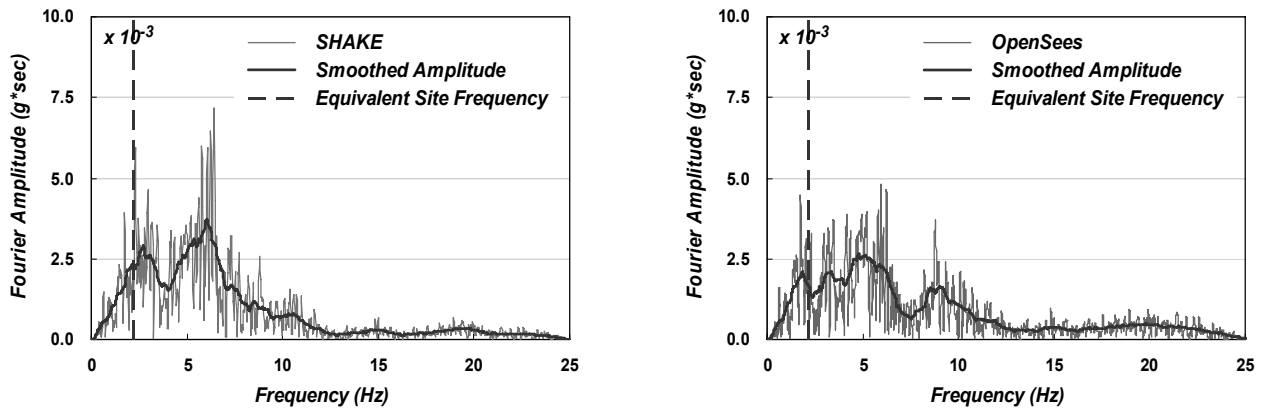
(b) Northridge(1994) 지진, PGA=0.234g

<그림 6> 선형탄성지반에 대한 주파수영역해석(SHAKE)과 시간이력유한요소해석(OpenSees) 결과의 비교



Morgan Hill(1984) 지진,  $PGA=0.069g$       Hollister(1974) 지진,  $PGA=0.132g$       Northridge(1994) 지진,  $PGA=0.234g$

<그림 7> 비선형지반에 대한 SHAKE와 OpenSees 의 자유장 해석결과 비교(연약지반의 깊이 : 30m)



지반조건 :  $V_s = 300\text{m/sec}$ ,    Depth = 30m,     $T_1 = 0.4\text{sec}$ ,     $f_1 = 2.5\text{Hz}$

<그림 8> Northridge(1994) 지진 응답의 주파수대역 비교

가선형해석이 응답을 과대평가한다.

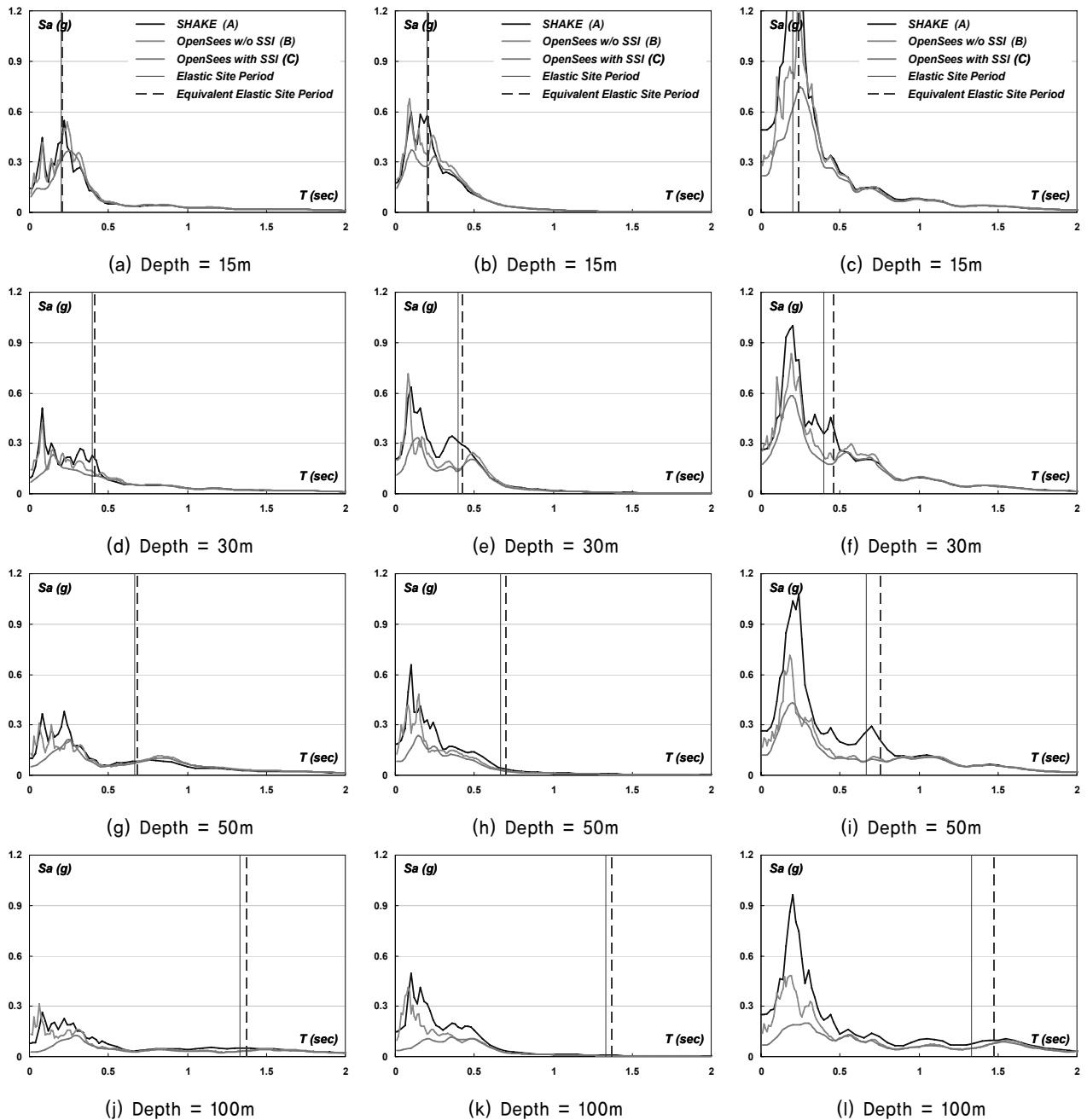
### 5. 지반-구조물 상호작용 효과

#### 5.1 연약지반 깊이의 영향

연약지반의 깊이에 따른 응답스펙트럼의 경향을 파악하기 위하여,  $V_s=300\text{m/s}$  연약지반의 깊이 15m, 30m, 50m, 100m에 대하여 해석을 수행하였다. 등가선형해석(SHAKE, 방법

A), 지반-구조물 상호작용이 고려되지 않은 비선형해석(OpenSees without SSI, 방법 B), 지반-구조물 상호작용이 고려된 비선형해석(OpenSees with SSI, 방법 C)을 수행하였으며, 결과는 그림 9와 같다.

전반적으로 연약지반의 깊이가 낮을수록, 단주기 영역에서 매우 큰 응답의 증폭이 발생하였다. 이러한 결과는 동일한 지반 종류의 경우에도 연약지반의 깊이에 따라서 응답스펙트럼이 크게 달라질 수 있으며, 따라서 얇은 연약지반과 깊은 연



Morgan Hill(1984) 지진, PGA=0.069g

Hollister(1974) 지진, PGA=0.132g

Northridge(1994) 지진, PGA=0.234g

$V_s = 300\text{m/sec}$ , 기초판의 폭 = 20m, 가정된 건축물의 질량밀도 =  $0.25 \text{ ton/m}^3$

<그림 9> 비선형 응답에 대한 연약지반 깊이의 영향( $V_s=300\text{m/s}$ )



약지반에 대하여 다른 응답증폭계수를 사용해야 함을 가리키고 있다.

지진응답의 큰 증폭은 지반과 구조물의 주기가 비슷한 경우에 공진현상에 의하여 발생한다. 그림 9는 탄성지반의 주기(수직실선)와 등가선형해석시 유효전단변형률로부터 재산정된 비탄성지반의 주기(Equivalent Elastic Site Period)(수직파선)를 나타내고 있는데, 이러한 지반강성과 깊이에 따른 지반주기의 변화는 표 3에 잘 나타나 있다. 그림 9(c)에 나타난 바와 같이 연약지반의 깊이가 15m로 낮은 경우에는 강진의 경우에도 지반의 주기가 단주기영역에 존재하여 단주기영역에 대한 응답스펙트럼값이 크게 증폭되었다. 반면에 연약지반의 깊이가 증가할수록 지반의 주기가 증가하여 단주기영역에 대한 응답의 증폭이 상대적으로 작게 나타났다. 이러한 결과는 현행기준과 같이 지반의 전단파속도(또는 강성)에 따라서 응답증폭계수를 정의하기 보다는 지반의 강성과 깊이의 영향을 함께 반영할 수 있도록 지반의 주기에 따라서 응답증폭계수를 정의하는 것이 바람직하다. 비탄성거동시에 지반의 주기를 정확히 평가하는 것은 어렵지만, 그림 7과 그림 9에 나타난바와 같이 지반의 비탄성등가강성에 근거한 지반의 주기가 탄성지반주기와 크게 다르지 않으며, 따라서 탄성지반주기에 근거하여 응답증폭계수를 정의할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 그림 9는 해석방법에 따른 응답스펙트럼의 차이를 보여주고 있다. PGA가 상대적으로 작은 Morgan Hill(1984) 지진과 (PGA=0.069g)에 대하여, 연약지반의 깊이가 15m, 30m 등으로 얇은 경우에는 해석방법에 따라 결과에서 큰 차이가 나타나지 않는다. 이는 지반의 변형이 탄성영역에서 일어나기 때문에 지반의 비선형거동과 지반-구조물 상호작용의 영향이 크게 나타나지 않기 때문이다. 그러나 PGA=0.234g 인 Northridge(1994) 지진의 경우와 같이 입력지진파의 규모가 큰 경우에는 지반거동의 비선형성, 지반-구조물 상호작용의 영향 등이 뚜렷이 나타난다. 이로 인하여 지반-구조물 상호작용이 반영된 응답(OpenSees with SSI, 방법 C)은 전 주기영역에서 다른 두 해석결과보다 크게 감소되었다. 이와 같이 지반의 비선형성과 지반-구조물의 상호

〈표 3〉 등가선형 해석시 깊이에 따른 등가탄성주기의 변화(Vs=300m/s)

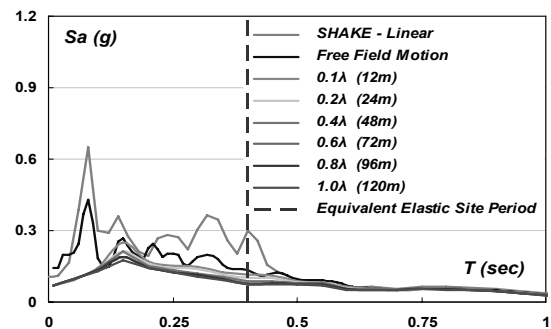
Soil Depth	Characteristic Site Period (sec)	Equivalent Elastic Site Period (sec)		
		Morgan Hill	Hollister	Northridge
15m	0.20	0.206	0.209	0.241
30m	0.40	0.413	0.425	0.460
50m	0.66	0.685	0.699	0.756
100m	1.33	1.377	1.371	1.472

작용, 즉, 지반-기초판-구조물의 운동학적인 상호작용(Kinematic Interaction)과 기초에 의한 감쇠(Foundation Damping)에 의하여 구조물의 지진응답이 크게 감소될 수 있음을 나타낸다. 이러한 연구의 결과는 기존 김용석<sup>(21)</sup>의 연구에서 지반-구조물 상호작용 해석결과 지반의 비선형성에 의하여 응답이 감소되는 경향과 부합된다.

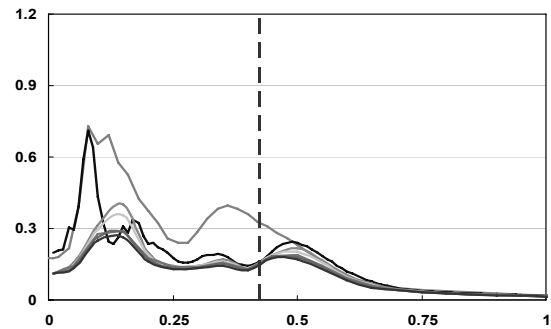
### 5.2 기초판 크기 영향

기초판의 크기의 변화에 따라서 지반-구조물 상호작용이 응답스펙트럼에 미치는 영향을 연구하였다. Vs=300m/s 연약지반의 깊이 30m를 사용하였다. 기초판의 크기 0.1λ ~ 1.0λ (λ = 파장)에 대하여 변수연구를 수행하였으며, 해석결과가 그림 10에 나타나 있다.

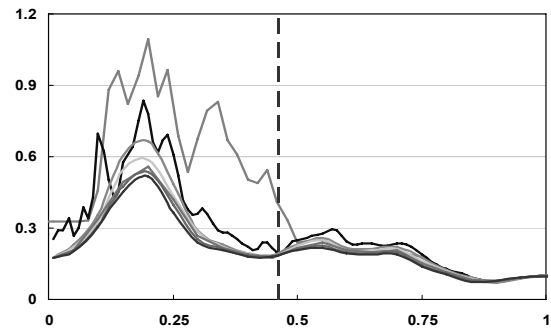
기초판이 있는 지반-구조물 상호작용을 반영한 응답스펙



(a) Morgan Hill(1984) 지진, PGA=0.069g



(b) Hollister(1974) 지진, PGA=0.132g



(c) Northridge(1994) 지진, PGA=0.234g

Vs = 300m/sec, Depth = 30m, T<sub>1</sub> = 0.4sec, f<sub>1</sub> = 2.5Hz

〈그림 10〉 지반-구조물 상호작용에 대한 기초판 크기의 영향

〈표 4〉 기초판의 크기에 따른 최대 응답가속도 비

	Morgan Hill		Hollister		Northridge	
	$pS_a(g)$	SSI/FFM ratio	$pS_a(g)$	SSI/FFM ratio	$pS_a(g)$	SSI/FFM ratio
FFM*	0.427		0.712		0.834	
0.1λ	0.247	0.58	0.366	0.51	0.599	0.72
0.2λ	0.214	0.50	0.319	0.45	0.568	0.68
0.4λ	0.213	0.50	0.299	0.42	0.541	0.65
0.6λ	0.187	0.44	0.293	0.41	0.547	0.66
0.8λ	0.188	0.44	0.281	0.40	0.533	0.64
1.0λ	0.175	0.41	0.263	0.37	0.519	0.62

\* Soil Depth = 30m, Vs = 300m/sec  
 \* 가정된 건축물의 질량밀도 = 0.25ton/m<sup>3</sup>  
 \* FFM(Free Field Motion) : 지반-구조물 상호작용이 적용되지 않은 자유장운동

〈표 5〉 단자유도 구조물의 질량에 따른 최대 응답가속도 비

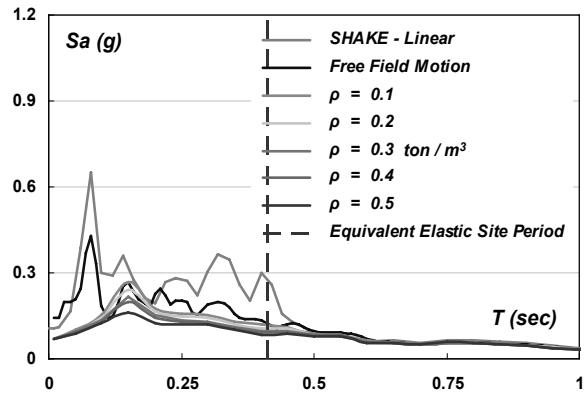
Mass Density	Morgan Hill		Hollister		Northridge	
	$pS_a(g)$	SSI/FFM ratio	$pS_a(g)$	SSI/FFM ratio	$pS_a(g)$	SSI/FFM ratio
FFM	0.427		0.712		0.834	
0.1	0.267	0.63	0.401	0.56	0.663	0.79
0.2	0.240	0.56	0.354	0.50	0.587	0.70
0.3	0.218	0.51	0.291	0.41	0.560	0.67
0.4	0.198	0.46	0.284	0.40	0.534	0.64
0.5	0.161	0.38	0.261	0.37	0.515	0.62

\* Soil Depth = 30m, Vs = 300m/sec  
 \* 기초판의 크기 = 0.2λ(=24m)  
 \* FFM(Free Field Motion) : 지반-구조물 상호작용이 적용되지 않은 자유장운동

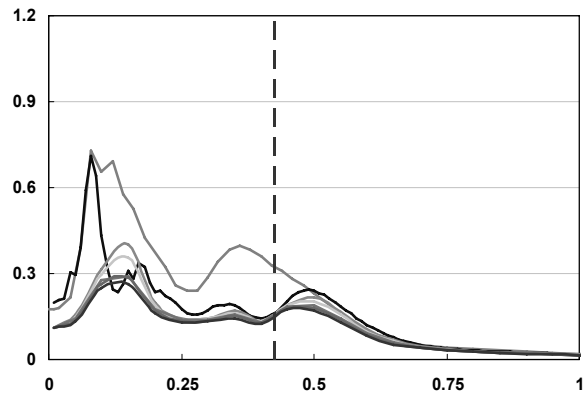
트럼에서 단주기영역의 구조물의 증폭이 작게 산정되었다. 기초판이 커질수록 최대응답가속도의 값이 점진적으로 감소되었으며, 최대응답가속도값에 대한 비는 표 4와 같다. 기초판의 크기가 가장 작은 경우(0.1λ)에도 자유장운동에 비하여 최대응답가속도가 약 50~70% 정도였으며, 기초판의 크기가 1.0λ인 경우에는 자유장운동에 비하여 약 40~60% 정도의 최대응답가속도가 산정되었다.

### 5.3 구조물 질량 효과

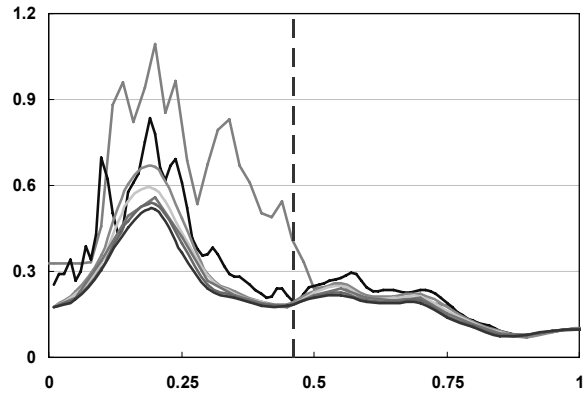
상부구조물의 단위질량 변화에 대한 응답스펙트럼의 변화를 연구하였다. Vs=300m/s 연약지반의 깊이 30m를 사용하였다. 기초판의 크기는 24m(= 0.2λ)를 사용하였으며, 단자유도 구조물의 주기에 10배를 건물의 층수로 가정하여 건물 전체의 부피를 구한 후, 질량밀도를 0.1~0.5ton/m<sup>3</sup>으로 변화시켜서 해석연구를 수행하였다. 해석결과는 표 5와그림 11



(a) Morgan Hill(1984) 지진, PGA=0.069g



(b) Hollister(1974) 지진, PGA=0.132g



(c) Northridge(1994) 지진, PGA=0.234g

Vs = 300m/sec, Depth = 30m, T<sub>1</sub> = 0.4sec, f<sub>1</sub> = 2.5Hz

〈그림 11〉 지반-구조물 상호작용에 대한 구조물 질량의 영향

에 나타나 있다. 그림에 나타난 바와 같이 구조물의 응답은 단위질량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내지만, 단주기 영역에서는 질량의 영향과 관계없이 응답이 크게 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 지반의 비선형성이 증가되는 Northridge 지진(PGA=0.234g)에서는 질량의 증가에 따른 영향으로 지반-구조물상호작용에 의하여 응답의 감소가 크게 발생하였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 얇은 연약지반의 국내지반환경에서 구조물의 지진응답을 정확히 예측할 수 있는 비선형지반해석방법을 연구하였다. 지반의 비선형변형에 의한 강성의 변화를 고려하고, 얇은 연약지반에서 지반-구조물 상호작용을 직접 고려하기 위하여 지반-구조물 모델에 대한 시간이력 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 입력지진파로서 지표면에서 실측된 **Outcropping-Motion**을 기반암깊이의 **Within-Motion**으로 변환하였다. 제안된 해석방법과 모델을 사용하여 다양한 변수에 대하여 해석을 수행하였고, 그 결과를 등가강성 주파수해석(SHAKE)의 결과와 비교하였다.

1. 선형지반거동에 대해서는 주파수영역해석과 시간이력유한요소해석과 차이가 없었다.
2. 지반의 비선형변형이 큰 경우, 즉, 연약지반이고 중강진의 경우에는 등가선형 주파수영역해석에 의한 응답스펙트럼이 비선형유한요소해석결과 보다 크게 나타났다. 이는 주파수영역해석에서 사용하는 등가강성이 실제 강성의 변화를 정확히 나타내지 못하였다는 것을 가리킨다.
3. 동일한 지반종류라고 할지라도 연약지반의 심도에 따라서 구조물의 응답이 다르게 나타났다. 특히, 연약지반의 깊이가 낮을수록 단주기영역의 응답이 크게 증가하였다. 따라서, 지반의 강성 뿐만 아니라 깊이의 영향을 반영할 수 있는 지반의 주기의 함수로 응답스펙트럼의 증폭을 정의하는 것이 바람직하다.
4. 지반-구조물 상호작용효과에 의하여 얇은 연약지반의 응답스펙트럼에서 응답이 감소되었다. 그 감소폭은 주기 1초 이하의 단주기 영역과 강진에 대하여 크게 나타났다. 따라서, 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않을 경우에는 단주기 구조물의 응답을 과대평가할 수 있다.
5. 기초판의 크기와 구조물의 질량이 증가 할수록 지반-구조물 상호작용에 의하여 응답스펙트럼이 감소했다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(핵심연구지원사업)의 지원을 받아 수행된 연구이며(400-2009121), 더불어 이 논문은 2010년도 두뇌한국 21(BK21) 사업에 의하여 지원되었음.

## 참고 문헌

1. AIK, *Korea Building Code-Structural*, Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea, 2009.
2. ICC, *International Building Code*, International Code Council, Country Club Hills, Illinois, 2006.
3. NEHRP, *Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures*, FEMA 450, Part I (Provisions). and Part 2(Commentary)., 2003.
4. 윤종구, 김동수, 방은석, “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구(I)-국내 내진설계기준의 문제점 분석,” 한국지진공학학회논문집, 제10권 2호, 39-50, 2006.
5. 윤종구, 김동수, 방은석, “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구(II)-국내 내진설계기준의 문제점 분석,” 한국지진공학학회논문집, 제10권 2호, 51-52, 2006.
6. 윤종구, 김동수, 방은석, “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구(III)-국내 내진설계기준의 문제점 분석,” 한국지진공학학회논문집, 제10권 2호, 51-52, 2006.
7. Schnalbel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B., 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.
8. Yoshida, N., Kobayash, S., Suetomi and I., Miura, K., “Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 3, 205-222, 2002.
9. 박두희, 정찬균, 곽동엽, “주파수와 변형률에 지배받는 등가선형 해석기법 개발 및 검증,” 한국지진공학학회논문집, 제24권 12호, 113-120, 2008.
10. Kim, Y-S., and Roesset, J.M., “Effect of Nonlinear Soil Behavior on Inelastic Seismic Response of a Structure,” *International Journal of Geomechanics*, Vol. 4, No. 2, 104-114, 2004.
11. <http://opensees.berkeley.edu/>
12. PEER, *Benchmarking of Nonlinear Geotechnical Ground Response Analysis Procedures*, 2008.
13. Jeremic, B., Jie, G., and Tafaazoli, N., “Numerical Modeling and Simulations of a Complete Earthquake Soil Pile Bridge Seismic Performance,” 2009 *International Foundation Congress and Equipment Expo*, ASCE, 2009.
14. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L., “Finite Dynamic Model for Infinite Media,” *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, 95 (EM4), 859-877, 1969.
15. 김동수, 추연욱, “공진주 시험을 이용한 국내 비점토 지반의 동적변형 특성,” 한국지반공학회 논문집, Vol. 17, No. 5, 115-128, 2001.

16. Kwok, A.O.L., Stewart, J.P., Hashash, Y.M.A., Matasovic, N. Pyke, R. Wang, Z., and Yang, Z., "Use of Exact Solutions of Wave Propagation Problems to Guide Implementation of Nonlinear Seismic Ground Response Analysis Procedures," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 11, 1385-1398, 2007.
17. 김용석, "구조물의 시간이력 지진해석을 위한 압반지진기록의 특성분석," 한국지진공학회논문집, 제12권 1호, 89-95, 2008.
18. NEHRP, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis procedures, *FEMA 440, Part 1 (Provisions). and Part 2 (Commentary)*, 2005.
19. Veletsos, A. S., Prasad, A. M., and Wu, W. H., "Transfer functions for rigid rectangular foundations," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 26(1). 5-17, 1997.
20. 김용석, 구조물-지반 상호작용과 지진해석, 구미서관, 2005.
21. 김용석, "건물의 수평방향 내진거동에 영향을 미치는 연약지반의 비선형성 영향," 한국지진공학회논문집, 제5권 2호, 23-31, 2001.