

지진파의 주파수 특성에 따른 지반-말뚝-구조물 상호작용계의 거동 특성 분석

A Study of Characteristics of Soil-Pile-Structure Interaction Behavior on the Frequency Contents of the Seismic Waves

김민규* 이종우* 이필규** 김문겸***
Kim, Min-Kyu Rhee, Jong-Woo Lee, Phil-Kyu Kim, Moon-Kyum
(논문접수일 : 2004년 3월 15일 ; 심사종료일 : 2004년 9월 2일)

요 지

본 연구에서는 기 개발된 유한요소-경계요소 조합을 통한 지반구조물 상호작용해석기법을 이용하여 주파수 특성이 다른 여러 가지 지진파를 이용한 수치해석을 통하여 지진파에 따른 거동특성을 분석하였다. 사용한 기본해의 검증은 위하여 적용된 다층 반무한 해를 Estorff 등의 연구결과와 비교하였으며, 기본해를 이용하여 개발된 지반-구조물 상호작용해석기법의 검증을 위하여 자유장해석을 수행하였다. 자유장 해석결과는 1차원 파진달 이론에 의하여 개발된 자유장응답해석 프로그램인 SHAKE의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 검증된 해석기법을 이용하여 특성이 다른 3종류의 지진파가 적용된 2차원 평면상의 지반-구조물 상호작용해석을 수행함으로써 지진파와 말뚝유무에 따른 지반-구조물 상호작용거동특성을 분석하였다. 해석결과 지진이 작용할 때는 말뚝기초를 사용하는 것이 반드시 유리한 결과를 주지는 않는다는 것을 알았으며, 지반의 비선형성을 고려할때는 말뚝의 유무가 지진응답결과에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 유한요소-경계요소, 지반구조물 상호작용해석, 자유장해석, 말뚝기초

Abstract

In this study, several Soil-Structure-Interaction (SSI) analyses were performed using the developed FE-BE coupling method and the seismic response behavior of the structure's systems was determined. For the verification of the fundamental solution which is used in this analysis method, a dynamic analysis of the homogeneous ground was performed and it was compared to the results of Estorff et al. In order to verify the seismic response analysis, the results are compared with those of another commercial code. Several kindd of SSI analyses were performed and the seismic response associated with the pile foundation, seismic waves and a consideration of the ground nonlinearity were determined. As a result, it was found that the pile foundations didn't greatly helpful during the seismic event.

keywords : FE-BE coupling method, soil-structure-interaction analysis, free field analysis, pile foundation

1. 서 론

국내에서 내진설계의 중요성이 대두된 것은 1995년 일

본의 고베지진 이후이고 그 이후 내진설계에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 구조물 중에서 가장 중요도가 높은 원전 구조물은 국내의 내진설계 기준이 수립되기

* 책임저자, 정회원 · 한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원 공학박사

전화: 042-868-8790 ; Fax: 042-868-8256

E-mail: minkyu@kaeri.re.kr

* 한국시설안전기술공단 기술개발실 차장 공학박사

** 안양과학대학 토목환경과 교수

*** 연세대학교 토목공학과 교수 공학박사

* 이 논문에 대한 토론을 2004년 12월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2005년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

이전부터 외국의 기준을 준용하여 엄격한 내진설계가 이루어져 왔다. 국내에도 내진설계가 필요한가에 대한 논란은 이제는 진부한 느낌마저 들고 있는 실정이다.

지반-구조물 상호작용해석기법은 초기에 원전구조물의 내진안전성을 향상시키기 위하여 개발된 해석기법으로서 기존의 해석기법이 지반의 영향을 고려하지 못하는 반면, 반무한 지반상에서의 파의 방사문제를 고려할 수 있으며, 지반을 통한 지진파의 전파를 고려함으로써 지반의 특성이 반영된 구조물의 지진응답을 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 원전구조물 뿐만 아니라 일반 구조물에도 그 적용성을 높여가고 있는 실정이다. 원전구조물의 경우는 암반상에 위치하기 때문에 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석을 수행하여도 고정기초로 고려하였을 경우와 비교하여 큰 차이를 보이지 않는 것이 사실이다. 그러나 월성 2,3,4호기와 같이 대상지반의 전단파 속도가 3500ft/sec이하인 비교적 연약한 경우에는 지반-구조물 상호작용효과는 반드시 고려하여야 할 문제인 것으로 판단된다.¹⁾ 국내의 경우 원전의 의존도가 모든 전력생산에서 가장 중요한 비중을 차지하고 있는 만큼 차후에는 기존과 같은 좋은 암반 부지를 선정하지 못할 경우 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 원전구조물의 내진 안전성 검토는 반드시 필요한 연구인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 2차원 평면상에서 개발된 지반-구조물 상호작용해석기법을 이용하여 발생가능한 여러 가지의 지진파를 이용한 지반-구조물 상호작용 해석을 수행함으로써 그 거동의 특성을 분석하였다.

2. 지반-구조물 상호작용

2.1 지진응답해석

지반-구조물 상호작용해석을 수행하기 위하여 선행되어야 할 것이 정확한 부지응답을 산정하는 일이다. 부지응답을 가장 정확하게 구하기 위해서는 지진이 발생 가능한 단층으로부터 실제의 단층운동이 발생할 것을 가정하여 에너지를 예측하고 에너지가 전파되는 지반조건을 모두 고려하여 알고자 하는 지점에서의 응답을 산출하는 것이다. 그러나 이러한 해석을 수행하고자 할 경우 진원으로부터 기반암까지의 전파경로에 많은 불확실성을 포함하고 있으므로 현실적으로 정확한 해를 구하는 데에는 많은 어려움이 따르며 단층운동을 예측하는데도 어려움이 있다. 따라서 토목공학에서 수행하는 지진응답해석에서는 기반암까지의 지반운동이 동일한 것으로 가정하여 기반암으로부터 발생하는 지진파가 지표층을 통과하면서 변화되어 지표면까지 전

파되는 현상을 규명하고 있다. 이와 같은 해석을 부지응답 해석이라고 하는데, 부지응답을 구하는 방법은 수치해석 시 고려하는 차원에 따라 1차원, 2차원 그리고 3차원 해석으로 구분할 수 있다. Hisada 와 Yamamoto²⁾는 부지응답해석의 방법을 해석차원에 따라 그림 1과 같이 구분하였다. 기존에 부지응답해석을 위해서 가장 널리 쓰이는 방법은 1차원 파 전달 이론에 기초해서 개발된 그림 1(a)와 같은 형태의 해석방법이다. 이 방법은 이상적인 상태에서의 정해를 구할 수 있고 해석시간이 매우 적게 걸린다는 장점이 있는 반면 2차원적인 지반조건의 변화를 고려할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 2차원적인 지반조건의 변화를 고려하고 해석의 효율성을 추구한다는 측면에서 그림 1(b) 및 (d)와 같은 조건을 고려할 수 있는 2차원 평면상 지진응답해석기법을 이용한 해석을 수행하였다.

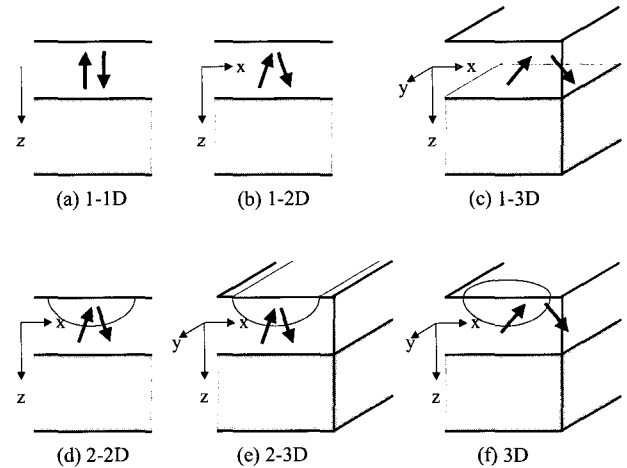


그림 1 부지효과를 고려한 지진응답해석의 차원²⁾

2.2 지반-구조물 상호작용 해석법

단층활동과 같이 지중에서 발산된 에너지는 지반을 매체로 하여 진원으로부터 지반과 접하는 구조물의 경계에 도달하게 되며, 이로 인하여 구조물은 진동하기 시작한다. 이와 동시에 구조물의 진동에 의하여 유발된 진동에너지의 일부는 구조물과 지반의 경계면을 통하여 다시 지반에 전달된다. 이와 같이 유한한 크기의 구조물과 반무한 영역으로 가정할 수 있는 지반이 관성력 및 파의 반사로 상호작용하며 운동하는 현상을 지반-구조물 상호작용이라고 한다.³⁾ 지반-구조물 상호작용해석을 통상적인 동적해석과 구별하는 가장 큰 이유는 지반의 반무한성으로 인한 지반의 동특성이 가진주파수에 따라 달라지기 때문이다. 이 때문에 지반-구조물 상호작용해석은 보편적으로 주파수영역에서 수행되며 시간영역응답은 주파수응답을 역 Fourier변

환하여 구하게 된다. 이 경우 해석은 선형해석에 국한되며 구조물과 지반의 비선형성은 등가선형화기법을 이용하여 근사적으로 고려할 수 있다.^{4),5)} 반무한 지반의 방사조건을 만족시키기 위하여 김재민 등⁶⁾은 무한요소를 이용한 해석법을 개발하여 다양한 구조물에 적용한 바 있다.

본 연구에서는 이와 같은 지반-구조물 상호작용 해석의 특성을 반영하기 위하여 주파수 영역에서 개발된 다층 반무한 기본해를 이용하여 개발된 지반-구조물 상호작용 해석기법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 해석기법은 2차원 평면상에서 파의 전파이론을 근거로 개발된 다층 반무한 기본해를 이용하여 2차원상에서 지진파의 전파를 효과적으로 예측할 수 있는 기법이다. 지표면으로부터 멀리 떨어진 외부영역에 대하여 경계요소법을 사용하므로써 반무한 평면에서의 방사조건을 만족시킬 수 있도록 하였고, 지표면에 가까운 지반을 내부영역으로 정의하여 유한요소로 모형화 함으로써 근역지반의 기하학적인 형상을 모형화 할 수 있도록 하였다. 이와 같은 방법을 사용하므로써 비교적 다양한 형상을 가지는 지반의 모형화가 가능하게 되었다. 개발된 기법을 수직 입사하는 지진에 대하여 상용프로그램의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였고, 이후 다른 주파수 특성을 가지는 세 가지 지진파를 이용한 지반-구조물 상호작용 해석에 적용하므로써 지진파의 변화에 따른 지반-구조물 상호작용거동의 특성을 분석하였다. 이러한 연구는 김문겸 등⁷⁾에 의해서 횡하중을 받는 단말뚝 시스템의 수치해석기법으로도 확장된 바 있다.

2.3 지진하중

지진으로 인한 지반운동은 다양하고 불규칙적이어서 지진해석을 수행하고자 하는 주어진 동일 지역에서도 각각 다르게 나타난다. 따라서 올바른 내진설계를 위한 지진해석에서의 지진은 다음과 같은 4가지의 종류로 구분지어진 지진의 특성을 반영한 대표지진을 선택하여야 한다. 지진은 다음의 4가지 종류로 구분할 수 있다.⁸⁾

1. single shock - 이러한 형태의 거동은 진앙으로부터 가까운 거리에 있는 견고한 지반인 경우와 천발지진의 경우 발생한다.
2. moderately long, extremely irregular motion - 진앙으로부터 중간정도의 거리에 떨어져 있는 지반이 견고한 곳에서 발생한다. 이것들은 거의 white noise의 형태를 띠고 모든 방향에서 거의 동일한 강도(severity)를 가진다.
3. Long ground motions exhibiting pronounced

prevailing periods of vibration - 진앙으로부터 중간정도의 거리에 떨어진 지반의 경우 지진이 연약지반을 통과하면서 filtering 된 결과로서 발생한다.

4. ground motion involving larger scale permanent deformations of the ground - 근거리 지진에 해당한다.

최근 들어 Kobe지진 발생 후 근거리 지진의 진동특성이 기존에 지진해석에서 고려하던 지진의 형태와 많이 다르므로 근거리 지진에 대한 관심이 높아지고 있으나 아직도 대부분의 지역에서 지진에 의해 피해를 발생시키는 것은 2번째와 3번째 그룹에 해당하는 지진이다. 따라서 이러한 형태를 갖는 대표적인 지진을 선택하여 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하였다.

3. 지반구조물 해석기법

본 연구에서 사용한 지반-구조물 상호작용 해석기법은 기존의 연구들에서 소개한 바 있으나 간략하게 개발된 기법에 대하여 소개한다.

3.1 내부영역과 외부영역의 정식화

외부영역의 경계요소해석을 위해서 다음과 같은 다층 반무한 평면에서의 동적 기본해를 사용하였다.^{9),10)}

$$\tilde{u}_{qr}^*(\omega, x, z, z_s) = \frac{C_n}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [k^n e^{(-kz - ikx')}] dk \quad q, r = x, z \quad (1)$$

여기서, C_n 은 파동수 k 에 독립적인 상수이고 z^* 및 x^* 는 각각 수진점과 가진점간의 수직거리 및 수평거리이다. 변위와 응력성분으로 표현되는 기본해를 이용하여 특이점의 영향을 고려한 구조계의 직접 경계적분방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{ik} u_i + \int_{\Gamma} p_{ik}^* u_k d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ik}^* p_k d\Gamma + \int_{\Omega} u_{ik}^* \rho \chi_k d\Omega \quad (2)$$

여기서, c_{ik} 는 경계면의 기하학적 형상에 의해서 결정되는 상수이고, p_k 와 p_{ik}^* 는 각각 실제 하중과 가상의 단위 동하중에 의한 경계면 Γ 에서의 표면력이며, χ_k 는 물체력을 나타낸다. 본 연구에서는 기본해에 물체력의 영향을 포함하므로 식 (2)의 영역적분항은 없어지게 된다. 이 식을 이용해 전체 경계에 대한 계방정식을 행렬형태로 구성하면 식 (3)과 같다.

$$[S^{BE}(\omega)]\{u^{BE}(\omega)\} = \{F^{BE}(\omega)\} \quad (3)$$

여기서, $[S^{BE}(\omega)]$ 는 경계요소에서의 강성행렬이고, $\{u^{BE}(\omega)\}$ 는 변위벡터이며, $\{F^{BE}(\omega)\}$ 는 하중에 대한 벡터이다. 그러므로 행렬식 (3)에 대한 해를 구하여 경계요소해석을 수행할 수 있다.

내부영역의 유한요소해석을 위해서 다음과 같은 주파수 영역에서의 운동방정식을 구할 수 있다.

$$[S^{FE}(\omega)]\{u^{FE}(\omega)\} = \{F^{FE}(\omega)\} \quad (4)$$

식 (4)에서 $[S^{FE}(\omega)]$ 는 임피던스행렬로서 식 (5)와 같이 표현되는 동적강성행렬을 나타내며 $[K^*]$ 는 정적강성행렬을 나타낸다.

$$[S^{FE}(\omega)] = [K^*] + i\omega[C] - \omega^2[M] \quad (5)$$

유한요소의 동적강성행렬 $[S^{FE}]$ 와 경계요소의 동적강성행렬 $[S^{BE}]$ 는 모두 같은 형태의 하중-변위관계를 갖고 있으므로 이들의 조합이 가능하다. 즉, 유한요소와 경계요소 간의 접합면에서 공유하는 질점에 대해 강성행렬과 하중을 조합함으로써 전체 동적강성행렬과 하중을 구성하여 식 (6)과 같이 유한요소의 형태로 나타낼 수 있다.

$$[[S^{FE}] + [S^{BE}]]\{\{u^{FE}\} + \{u^{BE}\}\} = \{\{F^{FE}\} + \{F^{BE}\}\} \quad (6)$$

이로부터 전체 동적강성행렬과 하중형태로 나타내면 식 (6)은 식 (7)과 같이 된다.

$$[S^G]\{u^G\} = \{F^G\} \quad (7)$$

여기서, $[S^G]$ 는 조합된 전체 동적강성행렬이고 $\{u^G\}$ 는 조합된 전체 변위이며, $\{F^G\}$ 는 조합된 전체 외부 작용하중을 나타낸다.

3.2 지진응답 해석

지진 하중을 받는 지반-구조물의 상호관계를 나타내는 운동방정식을 유도하기 위해서는 다음의 그림 2와 같은 반무한 지반상에 근입된 구조물을 생각할 수 있다.³⁾ 구조물은 그림에서처럼 이산화되고 지반과 구조물의 경계점에서는 하첨자 b를 사용하고 구조물에서는 S를 사용한다. 동적계는 실제 구조물과 굴착된 지반의 두 개의 부 구조계로 구성되어진다. 부 구조계의 차별화를 위한 상첨자 S는 구조물을 나타낸다. 또한 지반은 굴착이 안된 지반과 굴착된 지반으로 나타낼 수 있는데 이를 구별하기 위하여 상첨자

f와 e를 각각 사용한다. 여기에서 굴착이 안된 지반을 자유장이라 한다. 동적 운동방정식은 주파수영역에서 해석이 되며 총 변위크기는 $\{u_s^f(\omega)\}$ 와 $\{u_b^f(\omega)\}$ 로 나타낼 수 있고, 구조물의 동적강성행렬 $[S(\omega)]$ 는 $[S_{ss}(\omega)]$, $[S_{sb}(\omega)]$, $[S_{bs}^s(\omega)]$ 로 구분할 수 있다.

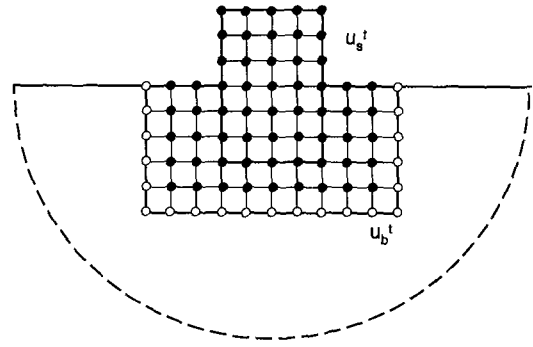


그림 2 지반-구조물 상호작용계

이것을 이용하여 전체 지반-구조물 상호작용계의 운동방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}^s(\omega)] - [S_{bb}^e(\omega)] + [S_{bb}^f(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^f(\omega)\} \\ \{u_b^f(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{bb}^f(\omega)]\{u_b^f(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

3.3 등가선형화기법

지진 하중이 작용하고 있는 상태에서 지반의 거동은 매우 복잡하게 나타난다. 이러한 지반의 거동을 표현하기 위해서 본 연구에서는 등가선형화기법을 이용하였다. 등가선형화기법은 지반의 여러 가지 조건들에 의하여 변화되는 지반의 주된 동적 물성을 지반의 변형률에 따라 변화시켜 가면서 반복계산을 수행하여 지반의 비선형성을 반영할 수 있도록 하는 방법이다.

지반의 강성도는 반복 변형률 크기, 공극률, 평균 주 응력, 소성계수, 과압밀비, 반복 하중의 수에 의하여 영향을 받는다. 그림 3(a)에서 볼 수 있는 파와 같이 전단탄성계수는 변형률이 0 일 때 가장 큰 값을 나타내고 전단 변형률이 커질수록 전단탄성계수는 감소함을 알 수 있다. 전단 탄성계수를 최대 전단탄성 계수로 나눈 값으로 그래프를 그리면 그림 3(b)와 같은 전단탄성계수 감쇠 곡선(modulus reduction curve)을 얻을 수 있다. 같은 방법으로 전단 변형률에 따른 감쇠비를 모형화 할 수 있다. 따라서 지진하

중이 가해질 때의 가장 주된 지반물성요소인 전단탄성계수와 감쇠비를 이용한 반복해석을 수행할 수 있게 된다. 이론적으로는 작은 전단 변형률에서 에너지의 소산은 없기 때문에 반복 전단 변형률이 작을 때에는 감쇠비가 0이 되어야 하나 실제 실험에 의하면 감쇠비가 0이 되지 않는다. 또한 전단 변형률이 커짐에 따라 감쇠비는 점점 증가하게 된다.

등가선형화기법에 사용되는 유효전단변형률 강도(effective shear strain amplitudes)는 경험적인 감쇠계수 0.65를 사용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 최대 전단 변형률은 다음 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\gamma_{eff} = 0.65 \times \gamma_{max} \tag{9}$$

$$\gamma_{max} = \sqrt{(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + \gamma_{xy}^2} \tag{10}$$

주기 T에 대한 함수로 표현되는 제곱평균 평방근(RMS : root mean square) 값은 Parseval의 정의¹¹⁾를 이용하여 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

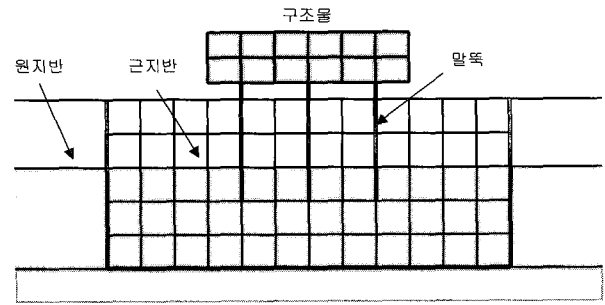
$$S^2(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T F(t)dt \tag{11}$$

이로써 최대 전단 변형률을 구하기 위해 푸리에 역변환을 통한 시간이력으로부터 구하지 않고 주파수영역 해석결과를 직접 이용할 수 있다.

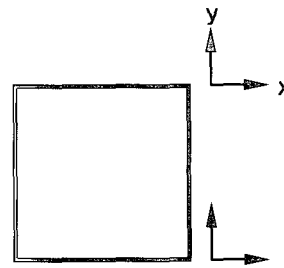
3.4 지반-말뚝-구조물계의 모형화와 각 요소

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용계에 축 하중을 받는 보 요소를 도입하므로써 그림 4와 같이 지반-말뚝-구조물계를 모형화 하였다. 그림 4(a)와 같이 원지반은 경계요소에 의하여 모형화 하였으며 근지반은 유한요소에 의한

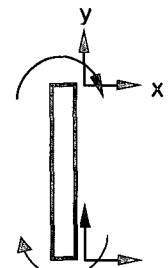
평면 변형률 요소로 모형화 하였다. 또한 구조물도 유한요소에 의한 평면변형률 요소로 모형화 하였으며 구조물과 지반 사이에는 축 하중을 받는 보 요소를 사용하여 지반-말뚝-구조물의 상호작용계를 모형화 하였다.



(a) 다층반무한 지반-말뚝-구조물 상호작용계



(b) 지반과 구조물요소



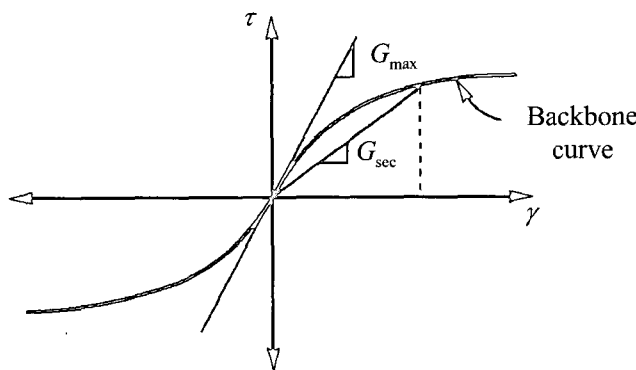
(c) 말뚝요소

그림 4 전체 상호작용계와 각 요소

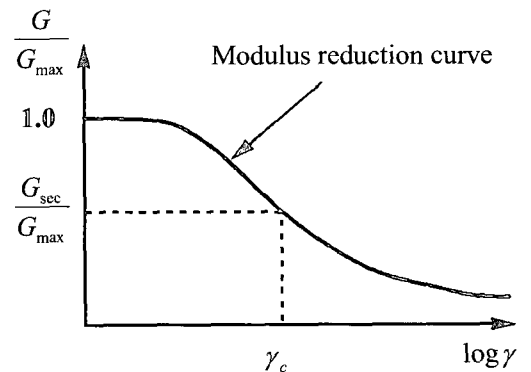
4. 해석기법의 검증

4.1 동적 경계요소해석의 검증

본 연구방법의 타당성 검증을 위한 검증 대상으로서 기반암위에 적층된 균일 지반에 대한 문제를 다루었다. 해석



(a)



(b)

그림 3 Backbone curve 와 전단탄성계수 감쇠 곡선⁴⁾

대상의 형태는 그림 5에 나타난 바와 같으며, 기반암에 적층된 상부 균일지층의 탄성계수는 266MPa, 포아송비는 0.33, 밀도는 2000kg/m³으로 하였다. 이때, 기존의 estorff 등¹²⁾의 방법은 기반암을 모형화하기 위해 고정된 경계조건을 이용하여 그 해를 구하였지만 본 연구에서는 개발된 다층반무한 기본해를 이용하기 위해 경계조건을 사용하지 않고 강성이 매우 큰 반무한 기반암으로 모형화하여 그 해를 구하였다. 해석결과는 그림 6에서 제시한 바와 같이 기존의 경계요소 해석결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이로부터 본 연구방법의 타당성을 입증할 수 있었다.¹³⁾

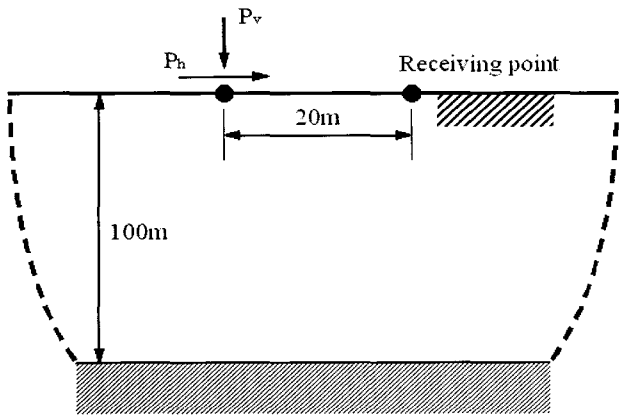


그림 5 기반암위에 적층된 균일지반

4.2 자유장응답해석기법 검증

현재 부지응답해석에 가장 널리 사용되는 방법은 1차원 파전달이론에 근거하여 개발된 SHAKE¹⁴⁾를 이용하는 것

이다. 따라서 본 연구기법의 타당성을 검증하기 위하여 임의의 지반을 대상으로 지반 내에서 입사하는 지진파에 의한 지표면에서의 응답을 비교하였다. 해석대상지반은 그림 7과 같은 균질 다층 반무한 지반을 대상으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 24개의 경계요소와 72개의 유한요소를 이용하여 수치모형화 하였다. 대상지반의 입력물성은 표 1에 정리한 바와 같고 입력운동은 1989년 발생한 Loma Prieta 지진 시 YERBA BUENA Island에서 계측된 최대 가속도는 0.07g이고, 지속시간은 40초인 기록을 사용하였다. 가속도 시간이력과 주파수영역에서의 기록은 그림 8(a) 및 그림 8(b)와 같다. 입력지진은 지표하 16m지점에서 입사하는 것으로 가정하였고 지표면에서의 응답을 관측하였다. 본 해석에서는 지반의 비선형성을 고려하기 위하여 등가선형화 기법을 사용하였으며 등가선형화 기법을 적용하기 위한 지반의 비선형 물성은 그림 9에 제시하였다.

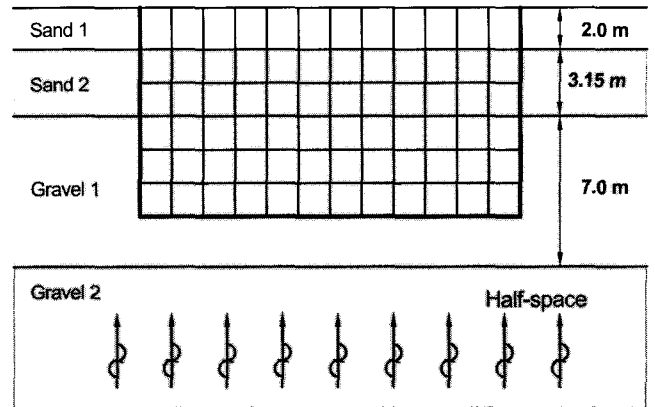
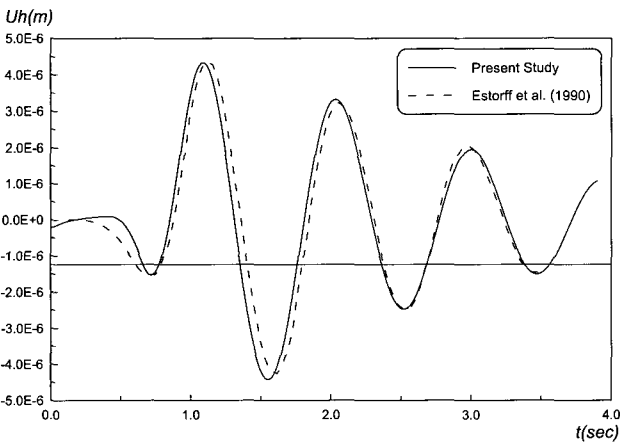
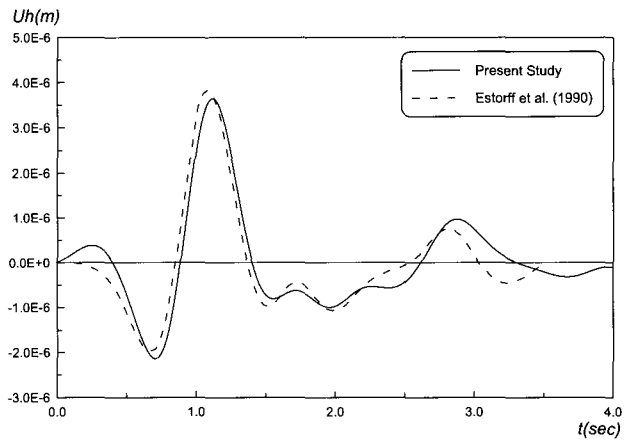


그림 7 본 연구의 검증에 사용된 지반



(a) 수직하중에 의한 수직 응답

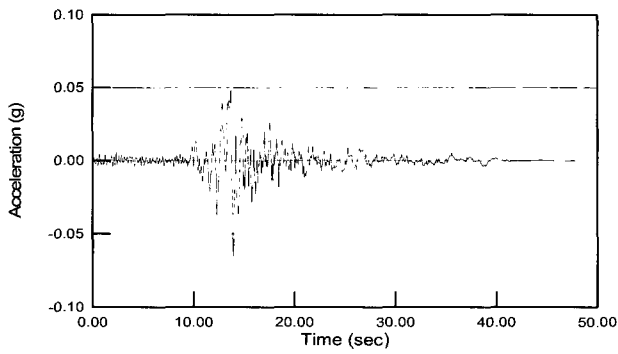


(b) 수평하중에 의한 수평 응답

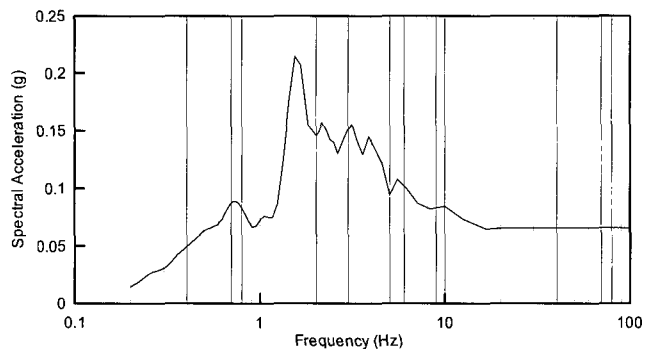
그림 6 해석결과의 비교

표 1 지진응답 비교에 사용된 지반물성

흙의 종류	전단파속도(m/s)	밀도(kg/m^3)	탄성계수(kN/m^2)	포아송비(ν_g)	감쇠비(ζ_g)
Sand 1	133	1.69	82,508	0.3	0.02
Sand 2	231	1.93	304,840	0.3	0.02
Gravel 1	317	2.42	714,959	0.3	0.02
Gravel 2	476	2.42	1,612,042	0.3	0.02

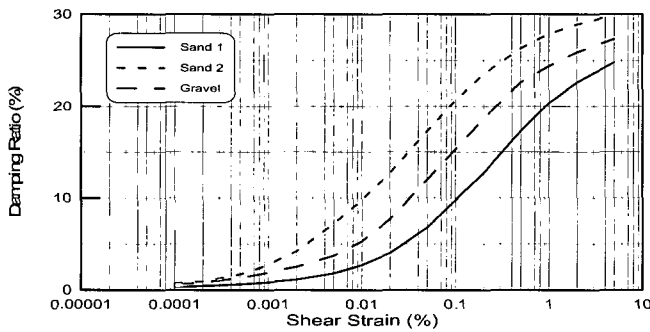


(a) 가속도 시간이력

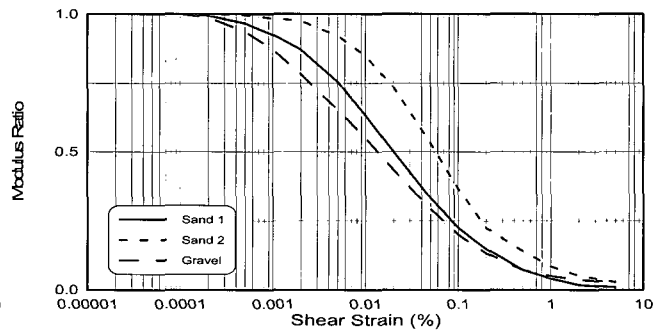


(b) 응답스펙트럼

그림 8 1989년 Loma Prieta 지진기록



(a) 감쇠비 곡선

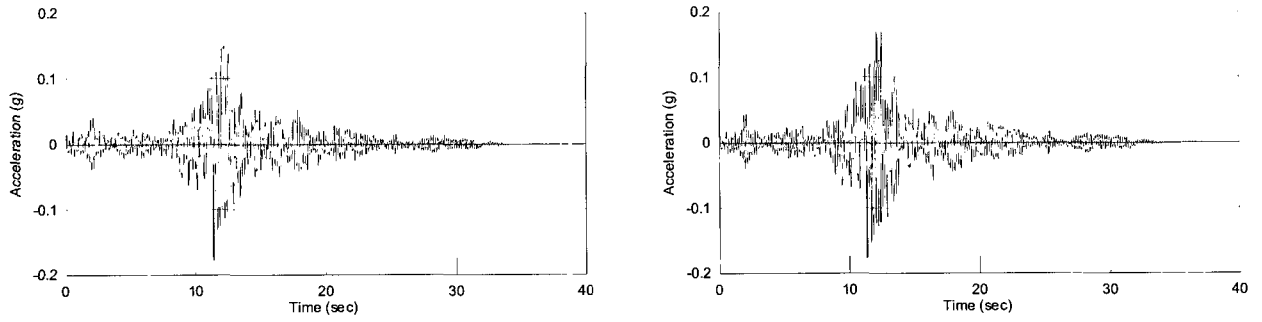


(b) 전단탄성계수 감쇠 곡선

그림 9 자유장응답해석에 사용한 지반물성

그림 7에 제시된 바와 같은 지하 16m에서 정의된 입력 운동에 의한 지표면에서의 시간영역 응답을 상용 프로그램인 SHAKE와 본 해석기법에 의해 수행한 결과는 그림 10에 선형해석의 결과를, 그리고 그림 11에 비선형해석의 결과를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 선형해석과 비선형해석 모두에서 수용할 만한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 해석결과의 응답스펙트럼을 다음의 그림 12에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 본 해석과 SHAKE를 이용한 해석결과가 공진주파수가 일치하는 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 다만 본 연구의 결과가 공진영역에서 다소 과소평가되고 있는 것을 알 수 있다. 이

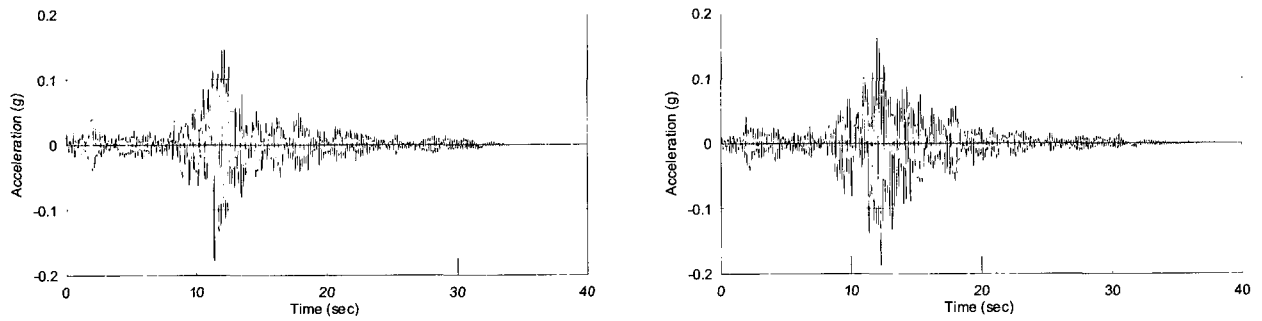
것은 해석기법의 차이에 의해서 발생한 것으로 전체적으로 시간영역과 주파수영역에서의 응답을 비교하였을 때 유사한 응답을 얻을 수 있으므로 본 연구의 지진응답해석기법이 타당함을 알 수 있었다. 또한 지반의 비선형성을 고려한 층에서의 감쇠비와 전단탄성계수의 수렴성을 알아보기 위해서 그림 13에서 반복계산에 따른 물성의 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 총 10회의 반복계산중에서 5회 이내에 물성이 수렴을 하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 등가선형화 기법이 올바르게 적용되었음을 알 수 있다.



(a) 본 연구

(b) SHAKE 91

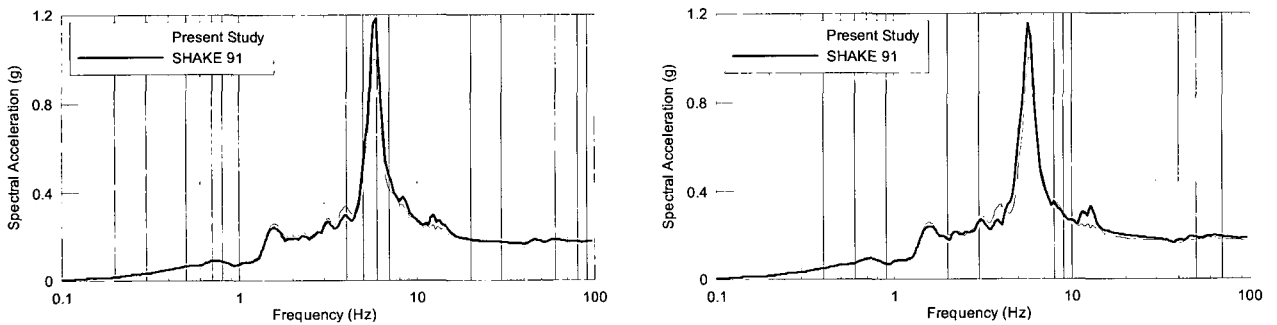
그림 10 지표면에서의 시간영역 응답가속도(선형해석)



(a) 본 연구

(b) SHAKE 91

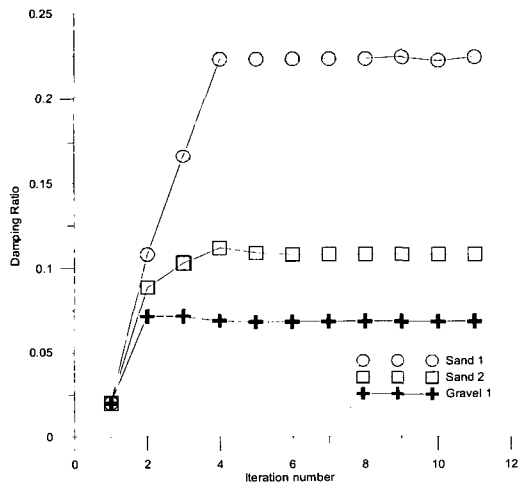
그림 11 지표면에서의 시간영역 응답가속도(비선형해석)



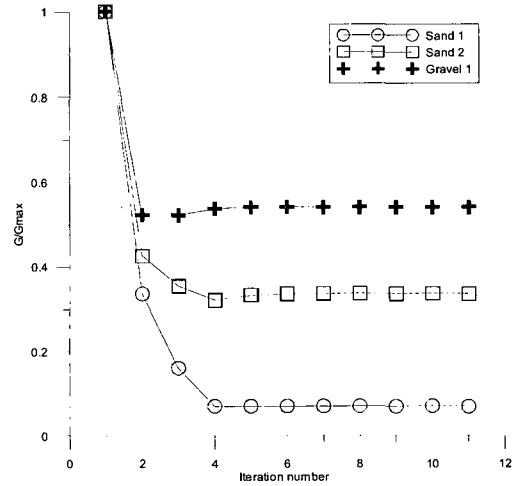
(a) 선형해석

(b) 비선형 해석

그림 12 응답스펙트럼 비교



(a) 감쇠비



(b) 전단탄성계수

그림 13 지반계수의 수렴

5. 지반-구조물 상호작용 해석

5.1 해석대상구조

본 연구에서 개발한 해석기법을 이용하여 지반-구조물 상호작용해석을 수행하였다. 해석대상은 그림 14에서 보는 바와 같이 임의의 지반-구조물 상호작용 시스템을 선정하였으며 말뚝이 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 해석을 각각 수행하여 말뚝기초가 지진응답에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝이 없는 경우는 26개의 경계요소와 100개의 유한요소를 조합하여 전체시스템을 모형화 하였으며, 말뚝이 있는 경우는 12개의 보요소를 이용하여 말뚝을 모형화 하였다. 각 요소 및 지반의 물성은 표 2와 표 3에 나타난 바와 같다. 해석 대상시스템은 암반상에 10m의 모래질 층이 덮여있는 가상의 지반을 선정하였으며 그 위에 기초와 상부구조물이 놓

여있는 것으로 하였다. 지반과 기초 및 상부구조물은 모두 평면변형률 요소로 모형화 하였으며 말뚝은 보요소를 이용하여 모형화 하였다.

5.2 강제진동해석

지반-구조물 상호작용해석을 위해서 선정된 임의의 시스템에서의 공진주파수 영역을 분석하기 위하여 상부구조물에 주파수별 횡방향 단위 조화하중을 가하여 그림 14의 Point A에서의 응답을 관측해 보았다. 해석결과는 다음의 그림 15에 제시한 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 27Hz까지의 자유진동해석결과 말뚝이 없는 경우에는 4.3 Hz에서 말뚝이 있는 경우는 4.4Hz에서 공진주파수가 발생하는 것으로 나타났고 이후에는 두드러진 peak 없이 감쇠하는 것을 알 수 있다. 이것은 말뚝의 유무에 따라서 전체시스템의 공진주파수가 변화 한다고 하기는 어려우며 다

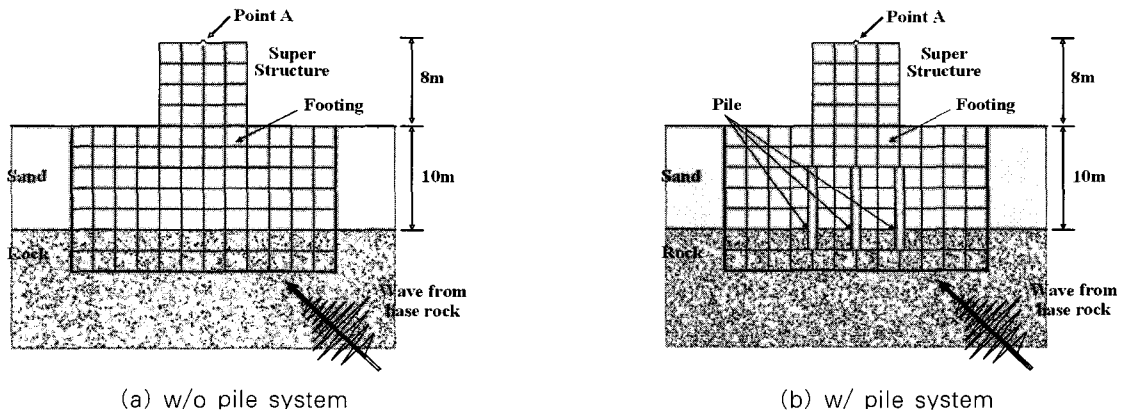


그림 14 해석대상 지반-구조물 상호작용 시스템

표 2 해석 대상 지반의 물성

지반	깊이(m)	전단파속도(m/s)	밀도(kg/m ³)	탄성계수(kN/m ²)	포아송비	감쇠비
모래	0 - 10	231	1,900	305,000	0.3	0.02
암반	10 -	1,000	2,400	6,292,000	0.3	0.02

표 3 해석대상 구조계의 말뚝-기초-상부구조물 물성

요소	물성종류	물성치	요소	물성종류	물성치
말뚝	탄성계수	E_P	기초	탄성계수	E_F
	포아송비	ν_P		포아송비	ρ_F
	밀도	ρ_P		밀도	ν_F
	길이	L		감쇠비	ζ_F
	감쇠비	ζ_P	상부구조	탄성계수	E_S
	반지름	R		포아송비	ν_S
	단면적	A		밀도	ρ_S
단면2차모멘트	I	감쇠비		ζ_S	

만 공진주파수 영역에서 peak값이 20%정도 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 말뚝기초의 유무에 따라서 저주파수 영역에서는 응답의 차이가 발생하지만 5Hz이상의 영역에서는 별다른 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 말뚝기초를 사용하는 것은 저주파수 영역의 지진시 효과를 발휘할 수 있음을 알 수 있다. 또한 두 번째 세 번째 peak에서는 말뚝이 있는 경우의 응답이 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 말뚝기초를 사용함으로써 반드시 지진응답에서 좋은 결과를 보이지 않을 수도 있음을 의미한다.

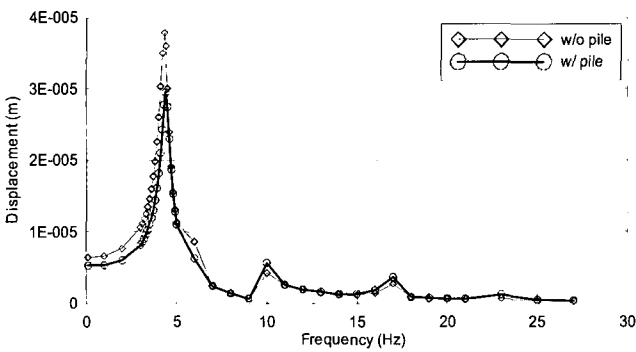
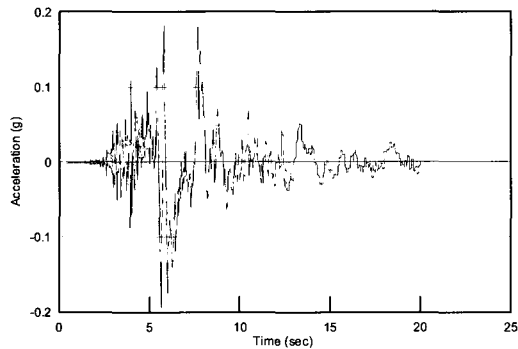


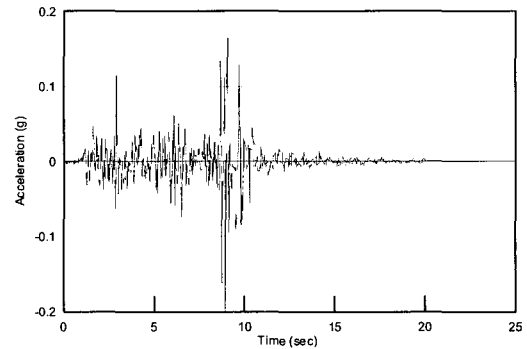
그림 15 지반-구조물 상호작용 시스템에 대한 강제진동해석결과

5.3 지진응답해석

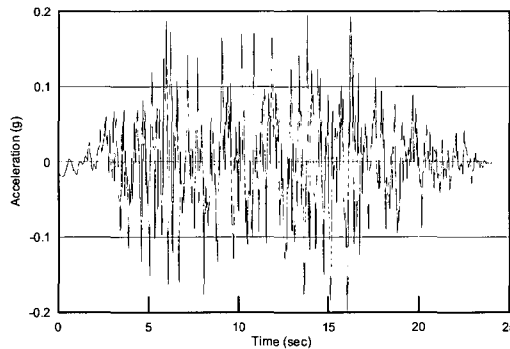
지진응답해석에는 두 가지의 실지진과 한가지의 인공지진파를 이용하였다. 실지진기록으로는 단주기 특성을 가지는 Nahanni지진과 장주기 특성을 가지는 Imperial valley 지진을 사용하였다.^{15),16)} Nahanni지진은 1985년 12월 미국 동부에서 발생한 지진으로 1.1g의 최대지반가속도를 가지는 단주기 특성을 가지는 지진으로서 본 연구에서는 x 방향 수평성분 지진기록을 이용한 해석을 수행하였다. Imperial Valley지진은 미국서부에서 1979년에 발생한 지진으로서 본 연구에서는 Array No.5에서 측정된 지진 기록 중 x방향 수평성분의 시간이력을 이용하여 해석에 이용하였다. 최대지반가속도는 0.38g이다. 또한, 본 해석에서는 US NRC에서 제시한 Regulatory Guide 1.60¹⁷⁾의 표준응답스펙트럼을 이용하여 생성한 인공시간이력(NRC)을 사용한 해석을 수행하였다. 사용한 NRC지진은 현재 국내의 원전설계시 사용하고 있는 표준설계응답스펙트럼을 사용한 인공지진파이다. 지진응답해석에 사용한 각 지진파의 가속도 시간이력과 응답스펙트럼을 다음의 그림 16과 그림 17에 제시하였다. 그림 17의 응답스펙트럼 그림에서 보는 바와 같이 Imperial Valley지진의 경우는 2-3Hz,



(a) Imperial valley 지진



(b) Nahanni 지진



(c) NRC Simulated Earthquake

그림 16 지반-구조물 상호작용 해석에 사용한 입력지진의 가속도 시간이력

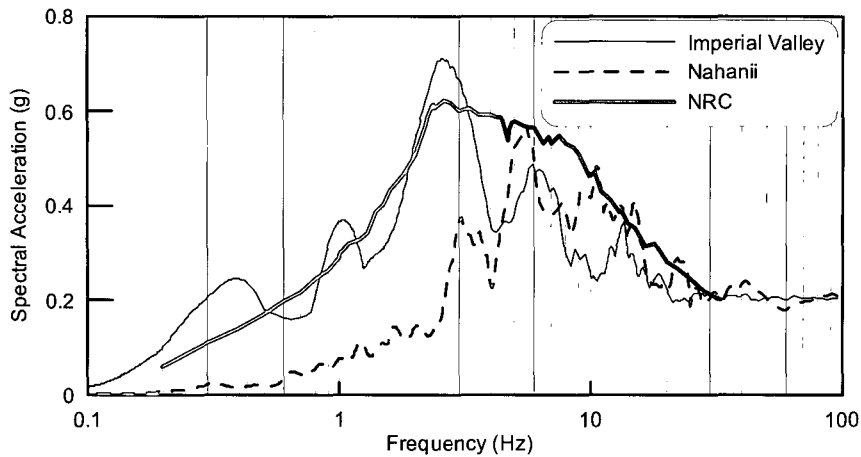
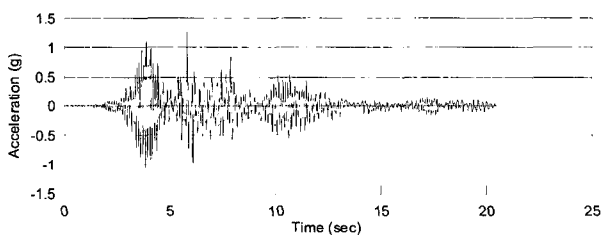


그림 17 입력지진의 가속도 응답스펙트럼비교

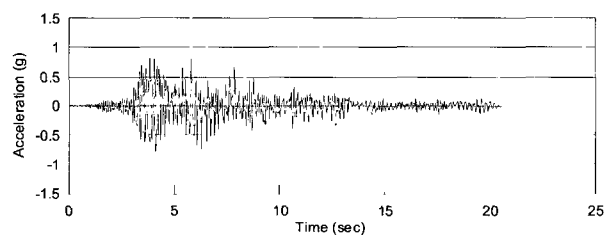
Nahanii지진은 5-6Hz, 그리고 NRC기준을 이용한 인공지진은 2-8Hz부분에서 탁월주파수가 형성되는 것을 알 수 있다. 입력지진의 PGA를 0.2g로 하여 응답해석을 수행한 것은 현재 원전의 내진설계기준에 맞춘 해석을 수행하는 것이 의미가 있을 것으로 판단했기 때문이다.

해석결과는 그림 14의 Point A에서의 가속도응답을 살펴보았다. 각 지진에 따른 Point A에서의 응답 가속도 시간이력은 다음의 그림 18-20에 사용한 지진파와 말뚝의 유무 그리고 선형해석과 등가비선형해석에 따라서 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 PGA를 사용했음에도 응답의 최대가속도는 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 일반적으로 말뚝기초를 사용하므로써 지진응답을 감소시킬 수 있을 것으로 생각되지만 그림 15에서 제시한 바와 같이 10Hz이상의 고주파수부분에서는 미소하나마 말뚝기초를 사용한 경우의 응답이 더 크게 평가되는 것을

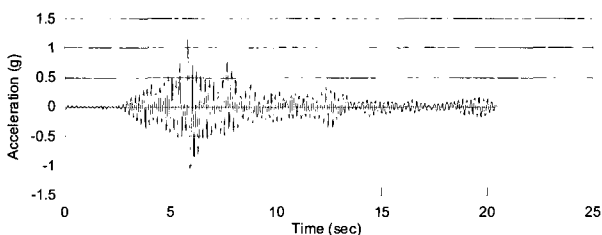
알 수 있다. 선형해석을 수행한 경우 이러한 결과가 장주기성분이 탁월한 Nahanii지진의 경우는 오히려 말뚝기초를 사용한 경우의 응답이 더 크게 증폭되는 결과를 보이고 있다. Imperial Valley지진과 NRC지진의 경우는 말뚝기초를 사용한 경우 각각 6%와 24%의 응답감소효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 표 4에 정리하였다. 등가비선형해석의 결과를 보면 선형해석의 경우에 비하여 말뚝의 유무에 따른 응답의 차이가 현저하게 감소하여 말뚝을 사용한 경우와 그렇지 않은 경우의 응답의 차이가 10%를 넘지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 최대가속도만의 비교에서 뿐만 아니라, 가속도 시간이력의 비교에서도 분명하게 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 즉 그림에서 보는 바와 같이 선형해석을 수행한 경우는 말뚝의 유무에 따른 전체 시스템의 응답의 차이가 가속도 시간이력에서도 분명하게 나타나지만 등가비선형 해석을 수행한 경우는 말



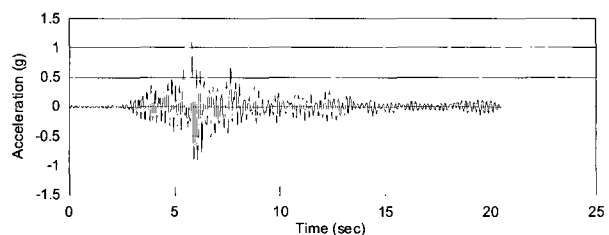
(a) 선형해석 without Pile



(b) 선형해석 with Pile



(c) 등가비선형해석 without Pile



(d) 등가비선형해석 with Pile

그림 18 Imperial Valley 지진시 구조물 상단에서의 지진응답

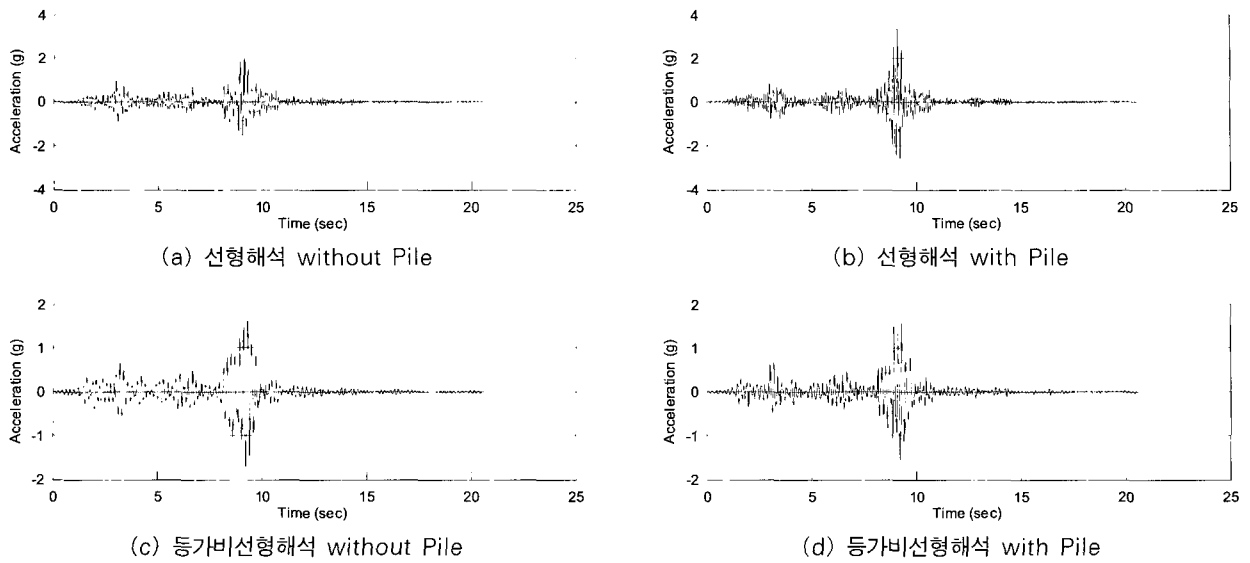


그림 19 Nahanii 지진시 구조물 상단에서의 지진응답

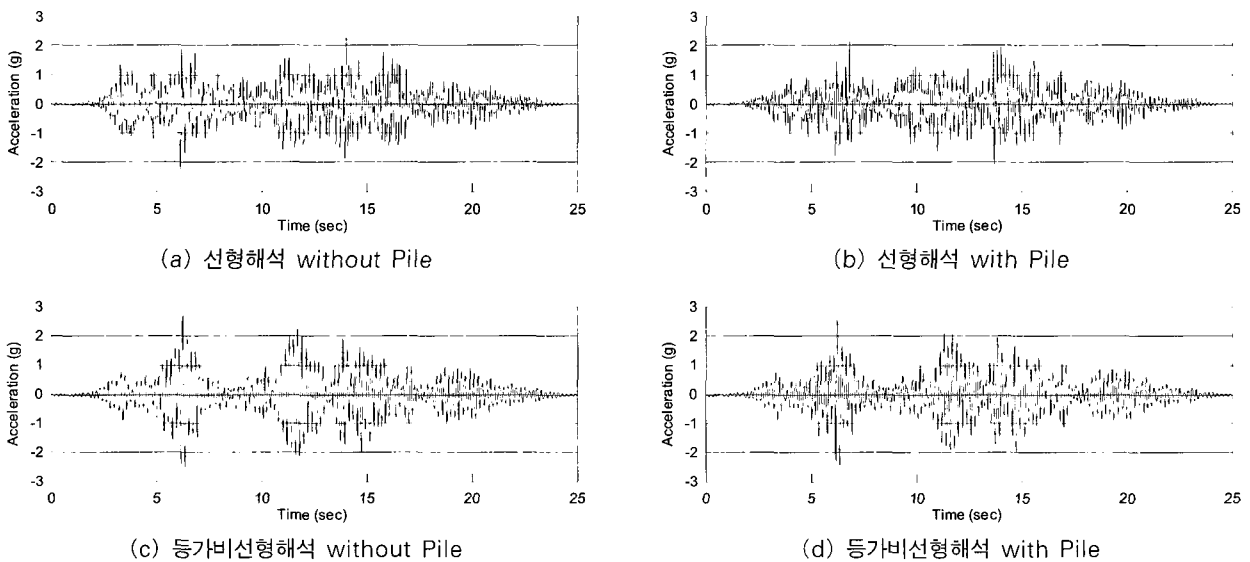


그림 20 NRC 지진시 구조물 상단에서의 지진응답

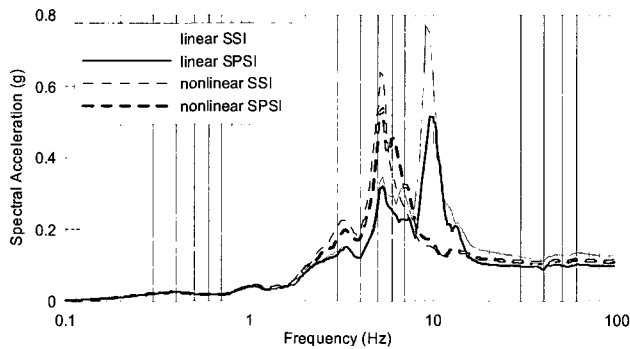
표 4 지진응답해석 결과 최대가속도 (단위:g)

	linear analysis		감소율 (%)	nonlinear analysis		감소율 (%)
	w/o pile	w/ pile		w/o pile	w/ pile	
Imperial Valley Eq.	1.26	0.97	77	1.15	1.09	95
Nahanii Eq.	1.97	3.40	172	1.73	1.59	92
NRC Eq.	2.29	2.16	94	2.71	2.53	93

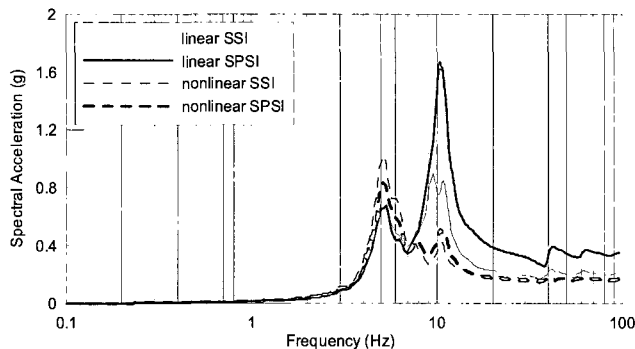
뚝의 유무가 전체 시스템의 응답에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 의미한다. 물론 이러한 결과를 일반적인 결과로서 받아들일 수는 없는 것이고, 다른 방법을 이용한 많은 검증들을 통하여 실증을 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러

나 본 연구의 결과만을 이용하여 판단한다면 지반의 비선형성이 나타날 정도의 지진이 발생할 경우 말뚝기초가 구조물의 안전성을 높여주는 데에 크게 기여하지 못한다는 것을 알 수 있다.

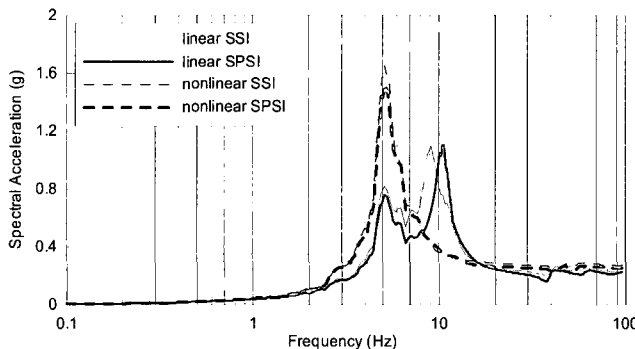
이러한 차이를 좀 더 명확하게 비교해 보기 위하여 각 경우의 가속도응답스펙트럼을 다음의 그림 21에서 비교하였다. 각 지진파에 따라서 말뚝의 유무와 해석방법의 차이에 따른 응답스펙트럼을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 지진파에서 선형해석시의 10Hz부분에서의 peak이 등가비선형해석을 수행함으로써 감소하고 5Hz부분에서 공진이 발생하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 등가비선형 해석을 수행하므로써 고주파수 성분이 감소하고 저주파수 성분의 증폭이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 앞에서 가속도 시간이력을 통한 비교에서도 알 수 있었던 바와 같이 말뚝기초의 사용유무에 따른 차이는 등가비선형 해석의 경우 매우 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) Imperial Valley Earthquake



(b) Nahanii Earthquake



(c) Simulated Earthquake based on US NRC

그림 21 응답스펙트럼 결과 비교

6. 결 론

본 연구에서는 기 개발된 지반-구조물 상호작용 해석기법을 이용하여 다양한 지진하중이 작용할 때 지반-구조물 상호작용 시스템에서의 지진응답을 살펴봄으로써 그 거동의 특성을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 개발된 기법을 이용하여 지진에 의한 지반-구조물 상호작용해석을 수행하였다. 말뚝의 유무와 비선형성의 고려여부에 따른 응답의 차이를 분석하였다. 해석결과 지반을 선형거동으로 가정한 경우 말뚝의 사용이 반드시 지진응답을 감소시키지는 않는 것으로 나타났으며, 전체 시스템의 공진영역에 대한 고찰이 있어야 함을 알 수 있었다.
2. 지반의 비선형성을 고려한 해석 결과 말뚝의 사용으로 인하여 지진응답의 저감이 10%이내인 것으로 나타났으며 가속도 시간이력을 비교해 본 결과 말뚝의 사용이 응답에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 다른 여러 해석방법을 이용한 추가적인 검증이 있어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이종림, 연관희, 허택영, 원전구조물의 지반-구조물 상호작용 해석기법 개선, '99 전력연-단162, 한국전력공사 전력연구원, 1995
2. Hisada, Y. and Yamamoto, S. *Eleventh World Conference about Earthquake Engineering*, Paper No. 2040, Acapulco, Mexico, 1996
3. Wolf, J.P. *Dynamic Soil-Structure-Interaction*, Prentice-Hall, 1985
4. Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1996
5. Seed, H.B. and Idriss, I.M. *Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*, Report No. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1970
6. 김재민, 윤정방, 김두기, "유한요소와 무한요소를 사용한 2차원 선형 지반-구조물계의 지진응답해석법," 한국전산구조공학회 논문집, 제10권, 제2호, 2002, pp. 231~244
7. 김문겸, 임윤목, 김민규, 조석호, "횡하중을 받는 지반-말뚝 상호작용계의 주파수영역 해석," 한국전산구조공학회 논문집, 제13권, 제4호, 2000, pp. 437~448
8. Ersoy, S. Ala Saadeghvaziri, M., Liu, G.U. and Mau, S.T., "Analytical and Experimental Seismic

- Studies of Transformers Isolated with Friction Pendulum System and Design Aspect," *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 4, 2001, pp. 569~595
9. Kim, Moon Kyum, Lim, Yun Mook and Rhee, Jong Woo, "Dynamic Analysis of Layered Half Planes by Coupled Finite and Boundary Elements," *Engineering Structures*, Vol.22, No.6, 2000, pp. 670~680
 10. Kim, Min Kyu, Lee, Jong Seh, Kim, Moon Kyum, "Two-Dimensional Seismic Response Analysis of Basin Effects," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 33~39.
 11. Randall, R.B. *Frequency Analysis*, Brüel & Kjør, 1987
 12. Von estorff, O., Pais, A.L. and Kausel, E. "Some Observation on Time Domain and Frequency Domain Boundary Elements," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 29, 1990, pp. 785-800
 13. 김문겸, 이종우, 조성용, "2차원 다층 반무한해를 이용한 지하구조계의 동적 경계요소 해석," 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제4호, 1997, pp. 59~68
 14. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B., *SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response of Horizontally Layered Sites*, Report No. EERC/72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, 1972
 15. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(I) : 암반지반 조건," 한국지진공학회 논문집, 제1권 제 4호, 1997, pp. 11~20
 16. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(II) : 연약지반 조건," 한국지진공학회 논문집, 제1권 제 4호, 1997, pp. 21~28
 17. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973