

지중공동을 고려한 지반-말뚝-구조물 상호작용계의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of Soil-Pile-Structure Interaction System considering the Underground Cavity

김민규* 임윤목** 김문겸*** 이종세****
Kim, Min Kyu Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum Lee, Jong Se

ABSTRACT

The major purpose of this study is to determine the dynamic behavior of soil-pile-structure interaction system considering the underground cavity. For the analysis, a numerical method for ground response analysis using FE-BE coupling method is developed. The total system is divided into two parts so called far field and near field. The far field is modeled by boundary element formulation using the multi-layered dynamic fundamental solution that satisfied radiational condition of wave. And this is coupled with near field modeled by finite elements. For the verification of dynamic analysis in the frequency domain, both forced vibration analysis and free-field response analysis are performed. The behavior of soil non-linearity is considered using the equivalent linear approximation method. As a result, it is shown that the developed method can be an efficient numerical method to solve the seismic response analysis considering the underground cavity in 2D problem.

Key Word : seismic ground motion, FE-BE coupling method, multi-layered dynamic fundamental solution, seismic response analysis, cavity

1. 서 론

도시의 지하공간은 여러종류의 라이프라인 시설물로 복잡하게 얽혀있다. 라이프라인 시설물은 상하수도를 비롯하여 전력구를 포함하는 공동구, 크게는 지하철에까지 해당된다고 할 수 있다. 이러한 시설들은 복잡한 도시환경의 미관과 안전성을 위하여 지하시설로 계획되고 시공되고 있다. 이러한 복잡한 지하환경은 상부구조물의 거동에도 영향을 미치므로 새로운 구조물이 계획될 때에는 지하환경에 대한 정확한 탐사와 관측을 통한 구조물의 거동을 분석하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 구조물 저면에 존재하는 지하공동이 지진발생시 구조물에 미치는 영향을 검토해 보기 위하여 기존에 개발되어 있는 2차원 평면변형률 상태에서의 지진응답해석기법을 이용하여 해석을 수행하였다. 특별히 구조물 기초형식에 따른 차이를 살펴보기 위하여 말뚝기초를 사용한 경우와 평판기초를 사용한 경우에 대한 해석을 수행하여 공동에 의한 지진파의 산란정도가 구조물에 미치는 영향을 살펴보았다. 개발된 지반-말뚝-구조물 상호작용 해석기법은 직접법에 기초한 방법으로 지반과 구조물은 평면변형률 요소를 사용하여 모형화 하였고, 말뚝은 보요소

* 한양대학교 건설환경시스템공학과 Post Doc, 공학박사, 정회원
** 연세대학교 토목공학과 조교수, 공학박사, 정회원
*** 연세대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 정회원
**** 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수, 공학박사, 정회원

를 사용하여 모형화 하였다.

2. 지진응답 해석

지진 하중을 받는 지반-구조물의 상호관계를 나타내는 운동방정식을 유도하기 위해서는 다음의 그림 1과 같은 반무한 지반상에 근입된 구조물을 생각할 수 있다^[1]. 구조물은 그림에서처럼 이산화되고 지반과 구조물의 경계점에서는 하침자 b 를 사용하고 구조물에서는 s 를 사용한다. 동적계는 실제 구조물과 굴착된 지반의 두 개의 부 구조계로 구성된다. 부 구조계의 차별화를 위하여 상침자를 사용한다. 상침자 s 는 구조물을 나타내며 상침자 g 는 굴착된 지반을 나타낸다. 또한 굴착된 지반은 굴착이 안된 지반과 굴착된 지반으로 나타낼 수 있는데 이를 구별하기 위하여 상침자 f 와 e 를 각각 사용한다. 여기에서 굴착이 안된 지반을 자유장이라 한다. 동적 운동방정식은 주파수영역에서 해석이 되며 총 변위크기는 $\{u'_s(\omega)\}$ 와 $\{u'_b(\omega)\}$ 로 나타낼 수 있고, 구조물의 동적강성행렬 $[S(\omega)]$ 는 $[S_{ss}(\omega)]$, $[S_{sb}(\omega)]$, $[S'_{bb}(\omega)]$ 로 구분할 수 있다.

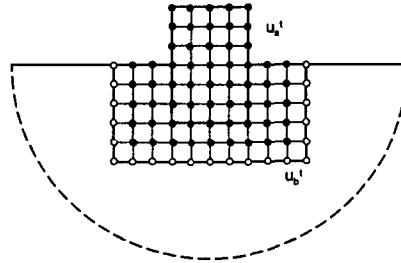


그림 1 지반-구조물 상호작용계

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

$$\begin{bmatrix} [S_{bs}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S'_{bb}(\omega)] - [S''_{bb}(\omega)] + [S'_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u'_s(\omega)\} \\ \{u'_b(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S'_{bb}(\omega)]\{u'_b(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

3. 내부영역과 외부영역의 정식화

외부영역의 경계요소해석을 위해서 다음과 같은 다층 반무한 평면에서의 동적 기본해를 사용하였다^{[2][3]}.

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

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 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{ik} u_i + \int_{\Gamma} p_{ik}^* u_k d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ik}^* p_k d\Gamma + \int_{\Omega} u_{ik}^* \chi_k d\Omega \quad (3)$$

여기서, c_{ik} 는 경계면의 기하학적 형상에 의해서 결정되는 상수이고, p_k 와 p_{ik}^* 는 각각 실제 하중과 가상의 단위동하중에 의한 경계면 Γ 에서의 표면력이며, χ_k 는 물체력을 나타낸다. 본 연구에서는 기본해에 물체력의 영향을 포함하므로 식 (3)의 영역적분항은 없어지게 된다. 이 식을 이용해 전체 경계에 대한 계방정식을 행렬형태로 구성하면 식 (4)과 같다.

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

여기서, $[S^{BE}(\omega)]$ 는 경계요소에서의 강성행렬이고, $\{u^{BE}(\omega)\}$ 는 미지의 변위와 하중 벡터이며, $\{F^{BE}(\omega)\}$ 는 기지의 변위와 하중에 대한 벡터이다. 그러므로 행렬식 (4)에 대한 해를 구하여 경계요소해석을 수행할 수 있다.

내부영역의 유한요소해석을 위해서 다음과 같은 주파수영역에서의 운동방정식을 구할 수 있다.

$$[S^{FE}(\omega)]\{u^{FE}(\omega)\} = \{F^{FE}(\omega)\} \quad (5)$$

식 (5)에서 $[S^{FE}(\omega)]$ 는 임피던스행렬로서 식 (6)과 같이 표현되는 동적강성행렬을 나타내며 $[K^*]$ 는 정적강성행렬을 나타낸다.

$$[S^{FE}(\omega)] = [K^*] + i\omega[C] - \omega^2[M] \quad (6)$$

유한요소의 동적강성행렬 $[S^{FE}]$ 와 경계요소의 동적강성행렬 $[S^{BE}]$ 는 모두 같은 형태의 하중-변위관계를 갖고 있으므로 이들의 조합이 가능하다. 즉, 유한요소와 경계요소간의 접합면에서 공유하는 절점에 대해 강성행렬과 하중을 조합함으로써 전체 동적강성행렬과 하중을 구성하여 식 (7)과 같이 유한요소의 형태로 나타낼 수 있다.

$$[[S^{FE}] + [S^{BE}]]\{\{u^{FE}\} + \{u^{BE}\}\} = \{\{F^{FE}\} + \{F^{BE}\}\} \quad (7)$$

이로부터 전체 동적강성행렬과 하중형태로 나타내면 식 (7)은 식 (8)과 같이 된다.

$$[S^G]\{u^G\} = [F^G] \quad (8)$$

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

4. 해석기법의 검증

개발된 해석기법의 검증을 위하여 말뚝기초에 대한 강제진동해석과 자유장 지반에서의 지진 응답해석을 수행하였다. 먼저 말뚝기초에 대한 강제진동해석은 김문겸 등^{[4][5]}의 연구에서 검증을 수행하였으며, 자유장 응답해석은 현재 부지응답해석에 가장 널리 사용되는 방법인 1차원 파전달 이론에 근거하여 개발된 SHAKE^[7]의 결과와 비교하였다. 따라서 지진응답에 대한 본 연구기법의 타당성을 검증하기 위하여 대표적인 지반을 대상으로 지반 내에서 입사하는 지진파에 의한 지표면에서의 응답을 비교하였다. 대상지반의 입력물성은 표 1에 정리한 바와 같고 입력운동은 1989년 발생한 Loma Prieta 지진시 YERBA BUENA Island 에서 기록한 지진기록을 사용하였다. 입력 지진의 가속도는 0.07 g 이고 지속시간은 40 초로서 가속도 시간이력은 그림 3(a)와 같고 주파수 영역에서의 기록은 그림 3(b)와 같다.

표 1 지진응답 비교에 사용된 지반물성

흙의 종류	깊이 (m)	전단파속도 (m/s)	밀도 (kg/m ³)	탄성계수 (kN/m ²)	포아송비	감쇠비
Sand 1	0 - 2.0	133	1,690	82,508.57	0.3	0.02
Sand 2	2.0 - 5.15	231	1,930	304,840.72	0.3	0.02
Gravel 1	5.15 - 12.15	317	2,420	714,959.13	0.3	0.02
Gravel 2	12.15 - 16	476	2,420	1,612,042.93	0.3	0.02
Gravel 3	16 - ∞	476	2,420	1,612,042.93	0.3	0.02

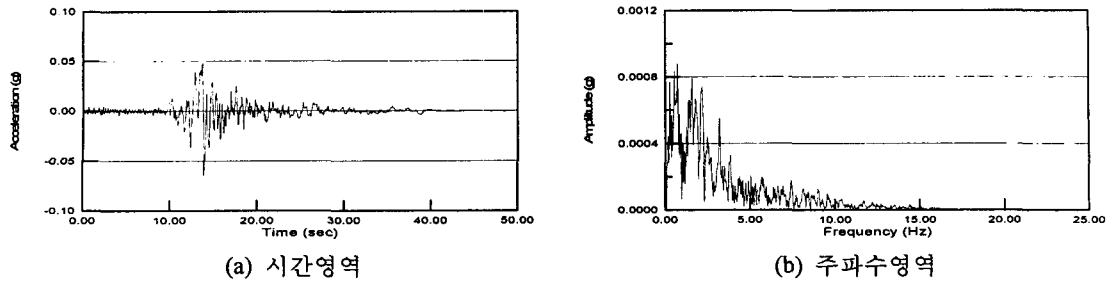


그림 3 1989년 Loma Prieta 지진기록

지하 16m 통제점에서의 입력운동에 의한 지표면에서의 시간영역 응답을 상용 프로그램인 SHAKE와 본 해석기법에 의해 수행한 결과는 그림 3과 같다. 상용 프로그램인 SHAKE에 의한 최대 응답가속도는 0.177g 이며 본 연구에서의 응답 최대 가속도는 0.171g 로 나타나 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 주파수 영역에서의 결과를 비교하여 보면 그림 4와 같이 나타난다. 주파수 영역에서도 SHAKE는 최대 응답 가속도가 0.00513g 가 나왔으나 본 연구에서는 0.00463g 로 나타나 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 전반적인 응답의 형상이 유사한 반면 최대값에서는 Shake의 결과보다 다소 작은 값을 보이는 것은 Shake의 해석은 1차원문제이므로 본 연구에서 수행한 2차원 평면변형률 문제에 비하여 에너지 방사가 적게 발생하기 때문으로 판단된다. 그러나 전체적으로 시간영역과 주파수영역에서의 응답을 비교하였을 때 유사한 응답을 얻을 수 있으므로 본 연구의 지진응답해석기법은 타당한 해석결과를 줄 수 있었다.

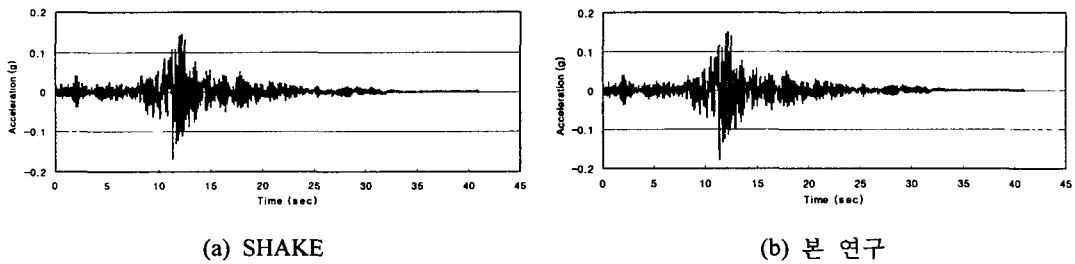


그림 3 지표면에서의 시간영역 응답가속도^[7]

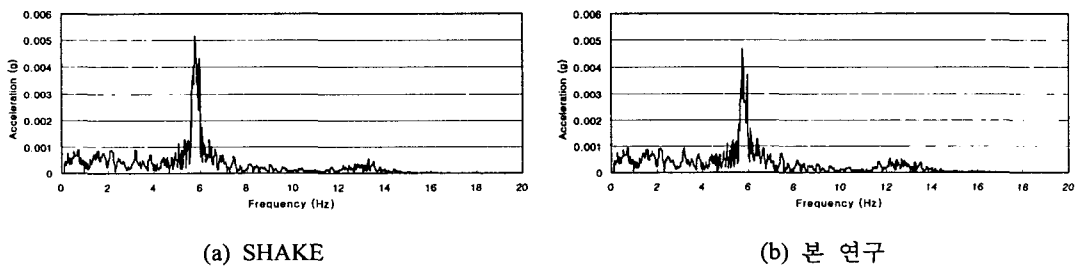
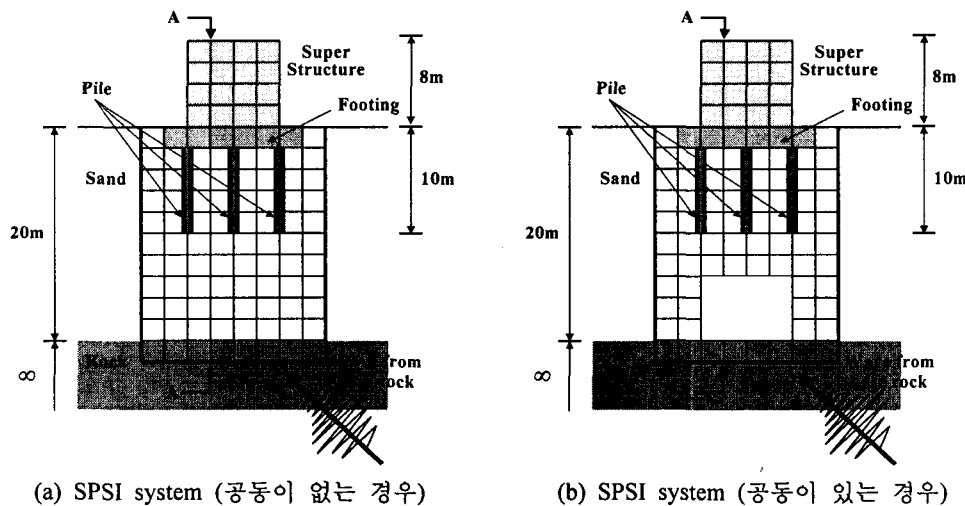


그림 4 지표면에서의 주파수영역 응답가속도^[7]

5. 지중공동을 고려한 지반-말뚝-구조물 상호작용계의 지진응답해석

지중공동에 의한 지진파의 산란효과는 지반조건과 지진파의 특성에 따라 그 효과의 차이가 달라지는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 동일한 수치모형을 사용하여 지반물성의 변화에 따른 지중공동의 영향을 살펴보고자 한다. 구조물은 말뚝기초인 경우와 그렇지 않은 경우의

두가지에 대한 해석을 수행하였다. 해석대상 수치모형은 다음의 그림 5와 같다. 공동의 유무와 말뚝의 유무를 고려하였으므로 모형은 그림과 같이 4가지에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석대상 구조물과 말뚝의 물성은 표 2에 제시한 바와 같고, 지반의 물성은 표 3에 정리하였다. 표 3에 제시한 바와 같이 상층 모래질 지반의 경우 탄성계수의 값을 500MPa에서 5,000MPa로 변화시키면서 해석을 수행하여 지반의 물성에 따른 응답의 산란정도를 비교하였다.



(a) SPSI system (공동이 없는 경우) (b) SPSI system (공동이 있는 경우)

그림 5 지반내 공동을 고려한 지반-말뚝-구조물 상호작용계

표 2 말뚝과 구조물의 입력물성

Element	Property Type	Value
Steel Pile	Youngs Modulus (GPa)	200
	Poisson's Ratio	0.3
	Density (kg/m ³)	7.85 × 10 ³
	Buried Length (m)	8
	Damping Ratio	0.025
	Radius (cm)	20.3
	Thickness (cm)	1.20
	Cross Section Area (m ²)	1.49 × 10 ⁻²
Footing & Structure	Moment of Inertia (m ⁴)	2.89 × 10 ⁻⁴
	Youngs Modulus (GPa)	30
	Poisson's Ratio	0.2
	Density (kg/m ³)	2.5 × 10 ³
	Damping Ratio	0.025

표 3 지반-말뚝-구조물 상호작용계 해석을 위한 지반물성

Soil Type	Depth (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Density (kg/m ³)	Youngs Modulus (MPa)	Poissons Ratio	Damping Ratio
Sand	0 - 20	323	2.0103	500	0.2	0.02
		456		1,000		
		790		3,000		
		1,020		5,000		
Rock	20 - ∞	1443	2.0103	10,000	0.2	0.02

해석 결과는 그림 5의 단면 A를 따라 변화하는 최대응답가속도를 깊이에 따라서 그림 6과 7에 도시하였다. 해석은 탄성해석과 지반의 등가선형화 기법을 이용하여 지반의 비선형성을 고려한 해석의 두가지를 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 지중공동의 영향은 공동의 바로 윗부분에서 크게 나타나지만 이러한 효과는 상층부로 갈수록 점점 감소하다가 지표면에서 그 효과가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 말뚝기초를 사용한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 지표면에서의 응답이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 말뚝기초를 사용한 경우 그렇지 않은 경우에 비하여 Rocking motion을 제어하기 때문인 것으로 판단된다. 등가선형화기법을 사용하여 지반의 비선형성을 고려한 경우는 그림 7에 도시한 바와 같이 탄성해석의 경우에 비하여 응답이 증가하는 것을 알 수 있다. 그것은 지반의 비선형성을 고려했기 때문으로 응답의 증가폭은 지반의 물성이 약할수록 더욱 커지는 것 또한 알 수 있다. 공동의 유무에 따른 지표면과 구조물 상단에서의 최대 가속도 응답의 차이를 표 4와 그림 8에 표시하였다. 표에서 보는 바와 같이 공동의 유무에 따라서 구조물 상단에서의 응답의 차이가 최대 9.19%가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 지반의 물성이 클수록 감소하지만 대부분의 말뚝기초를 사용하는 지반의 물성과 비교하면 구조물의 지진응답을 구할 때 지중공동의 영향이 무시할 수 없는 인자인 것을 알 수 있다. 또한 그림 8에서 보는 바와 같이 지반물성이 작아질 경우 선형해석과 등가선형화 해석에서의 차이가 역전되는 것을 알 수 있다. 이것은 지반의 비선형성이 고려된 경우 지반의 물성이 약할수록 평판기초에서의 차이가 더욱 크게 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 평판기초를 사용하는 경우에도 지중공동에 의한 영향이 크게 발생하므로 이러한 것을 반영한 해석이 반드시 필요함을 알 수 있다.

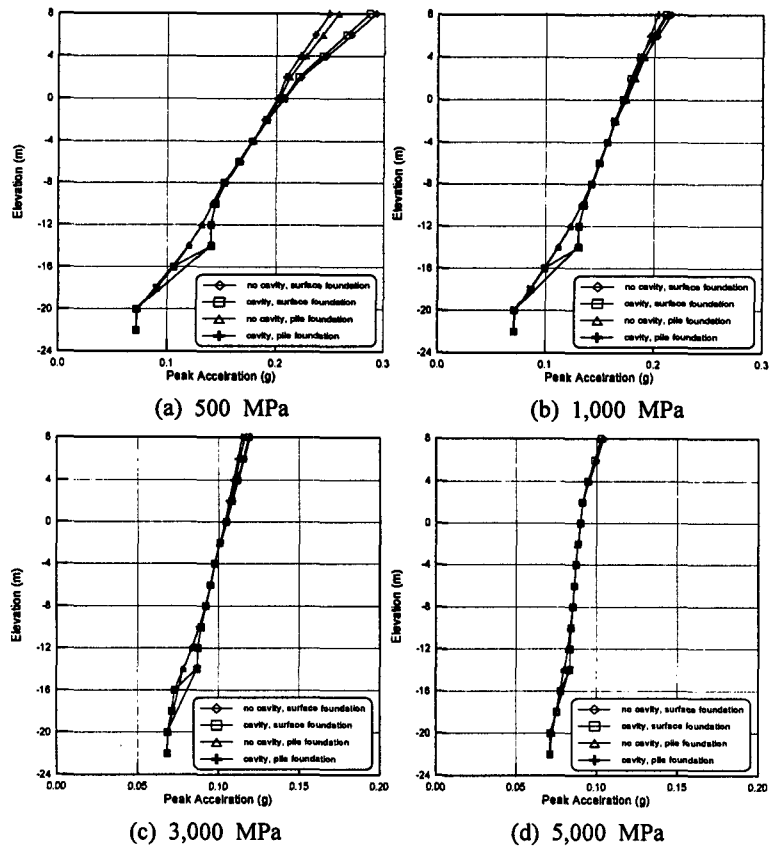


그림 6 상부지반 물성에 따른 최대응답가속도 (선형해석)

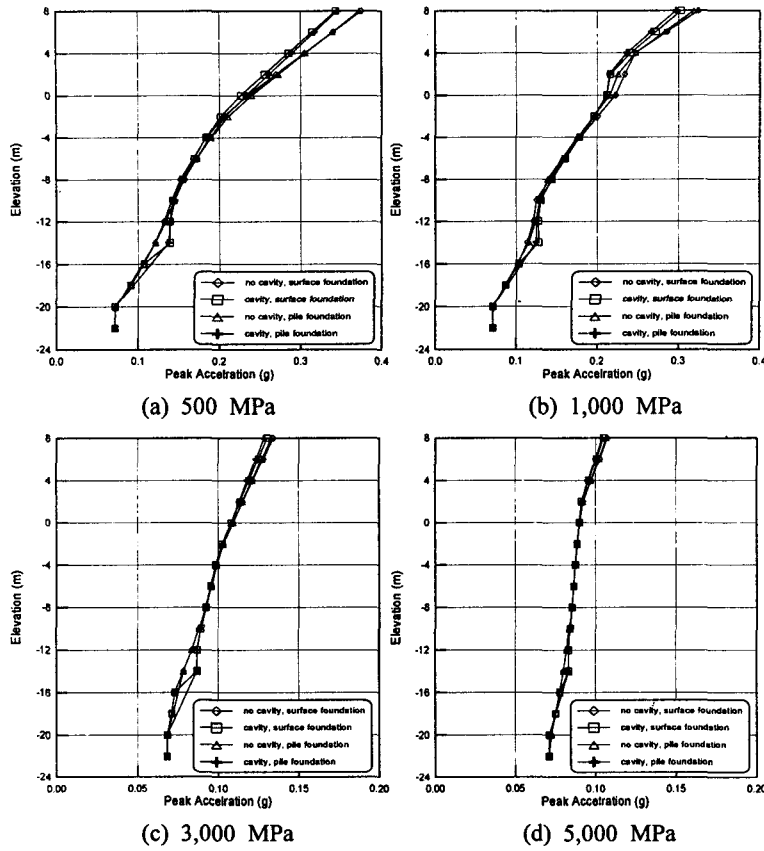


그림 7 상부지반 물성에 따른 최대응답가속도 (등가선형해석)

표 4 공동의 유무에 따른 응답의 차이 (단위 : %)

Elastic Modulus of Upper Layer			500MPa	1,000MPa	3,000MPa	5,000MPa
Linear Analysis	Pile Foundation	Surface	0.72	0.69	0.34	0.14
		Structure	4.47	4.26	1.35	0.58
Equivalent Linear Analysis	Surface Footing	Surface	0.52	0.48	0.22	0.11
		Structure	3.11	2.43	0.78	0.18
Linear Analysis	Pile Foundation	Surface	2.82	1.87	1.20	0.21
		Structure	7.94	7.45	3.51	2.53
Equivalent Linear Analysis	Surface Footing	Surface	3.89	1.17	1.02	0.15
		Structure	9.19	7.05	2.84	2.37

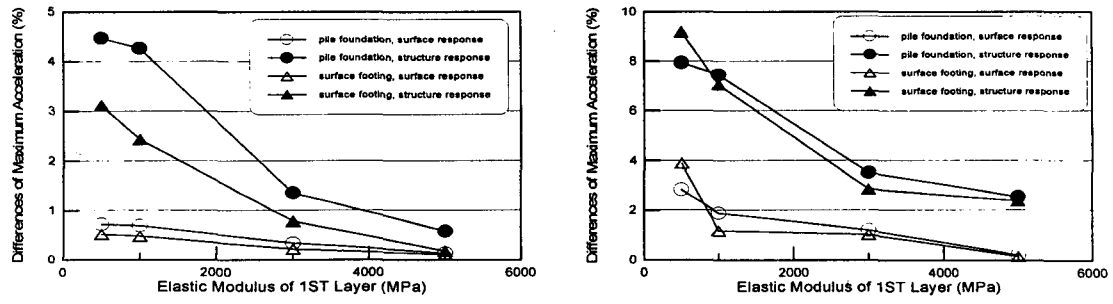


그림 8 공동의 유무에 따른 가속도응답의 차이

6. 결론

본 연구에서는 다층반무한 기본해를 이용하여 외부영역을 모형화하고 동적 유한요소를 사용하여 내부영역의 지반을 모형화하여 지중공동을 고려한 지진응답해석을 수행할 수 있는 2차원 평면에서의 해석기법을 개발하였다. 그 결과 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

- (1) 지반-구조물 상호작용이론에 근거하여 반무한영역의 방사조건을 만족시킬 수 있도록 외부영역은 경계요소로, 지반의 복잡한 형상을 모형화 할 수 있도록 내부영역은 동적 유한요소로 모형화 하여 2차원 평면상에서 부지응답해석을 수행할 수 있는 수치해석기법을 개발하였다. 개발된 부지응답해석 기법의 타당성을 알아보기 위하여 수평층상지반에서 입사하는 지진에 의한 지표면에서의 응답을 상용프로그램의 결과와 비교하여 보았다. 해석결과 시간영역과 주파수영역 모두에서 유사한 결과를 얻을 수 있었고 따라서 본 연구에서의 부지응답해석기법의 타당성을 확인할 수 있었다.
- (2) 개발된 해석기법을 사용하여 지반내 공동이 있는 가상의 단면을 선정하여 지진응답해석을 수행하였다. 말뚝기초를 사용한 경우와 평판기초를 사용한 경우에 대한 해석을 수행하여 공동에 더 크게 영향을 받는 기초형식에 대하여 고찰하였다. 해석결과 상부지반의 물성이 큰 값을 가질 경우 공동의 영향을 크게 받지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나 지반물성의 약할 경우 공동에 의하여 최대 9% 이상의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었고, 또한 등가선형화 기법을 이용한 비선형 해석에서는 물성이 작을 경우 말뚝기초의 경우보다 평판기초의 경우에 공동에 의한 영향을 더 많이 받는 역전효과가 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 지반내 공동에 의한 구조물에서의 영향이 비교적 크지는 않지만 지반 조건에 따라 구조물의 안정성에 문제가 발생할 수 있을 정도의 증폭효과를 관찰하였으므로 이에 대한 추가적인 고찰과 분석이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Wolf, J.P., *Dynamic Soil-Structure-Interaction*, Prentice-Hall, 1985.
2. 김문겸, 이종우, 이필규, 김민규, “접근해를 이용한 동적 2차원 다층 반무한 경계요소,” 대한토목학회 논문집, 제 18권, 제 I-5 호, pp. 625-636, 1998. 9.
3. Kim, M.K., Lim, Y.M., and Rhee, J.W., “Dynamic Analysis of Layered Half Planes by Coupled Finite and Boundary Elements,” *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 6, pp. 670-680, February, 2000.
4. 김문겸, 임윤묵, 김민규, 조석호, “횡하중을 받는 지반-말뚝 상호작용계의 주파수영역 해석,” 한국전산구조공학회 논문집, 제 13 권, 제 4 호, pp.437-448, 2000. 12.
5. Kim, Moon Kyum, Lim, Yun Mook, Kim, Min Kyu, Cho, Seok Ho, “Soil-Pile Interaction Analysis using FE-BE Coupling in Frequency Domain,” *Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, USA, March, 2001.
6. 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, p.88.
7. 김문겸, 임윤묵, 김민규, 이종우, “다층반무한 기본해를 이용한 자유장응답해석,” 한국지진공학회 논문집, 제 5 권, 제 2 호, pp.83-91, 2001. 4.