

부지효과를 고려한 2차원 평면상의 지진응답해석

Seismic Response Analysis Considering the Site Effect in Two Dimensional Cases

김민규* 임윤목** 김문겸***
Kim, Min Kyu Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum

ABSTRACT

The site effects of local geological conditions on seismic ground motion are performed using 2D numerical method. 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. In order to verify the seismic response analysis, the results are compared with those of commercial code. As a result, it is shown that the developed method can be an efficient numerical method to solve the seismic response analysis of the site effect in 2D problem.

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

1. 서론

지진공학에서 부지응답에 관한 문제는 오래전부터 크게 대두되는 문제중의 하나였다. 부지응답을 가장 정확하게 구하기 위해서는 지진이 발생가능한 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 단층운동을 예측하는 것과 진원으로부터 기반암까지의 전파경로에 많은 불확실성을 포함하고 있으므로 현실적으로 정확한 해를 구하는 것은 어려운 일이다. 따라서 많은 가정을 통해 지표에서의 응답을 구하는 방법들에 대한 연구가 수행되어 왔다.

부지응답을 구하는 방법은 수치해석시 고려하는 차원에 따라 1차원, 2차원 그리고 3차원 해석으로 구분할 수 있다. Hisada 와 Yamamoto^[1] 는 부지응답해석의 방법을 해석차원에 따라 그림 1과 같이 구분하였다. 그림 1(a)는 수평층에서 지진파가 수직으로만 입사하고 반사하는 경우로서 1차원해석의 경우를 의미한다. 그림 2(a)는 수평층이지만 지진파가 경사지게 입사하는 경우로서 완벽한 의미의 2차원 해석을 아니므로 1-2D라고 정의하였고, 마찬가지로 그림 1(c)는 1-3D로 정의하였다. 그림 1(d)는 지반의 형상이 2차원적으로 변하는 퇴적층과 같은 경우의 해석이 가능한 경

* 연세대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사, 학생회원
** 연세대학교 토목공학과 조교수, 공학박사, 정회원
*** 연세대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 정회원

우로서 2차원 해석이며, 그림 1(e)는 3차원 모형이지만 지진파가 3차원적으로 전파되는 것을 고려하지 못하는 경우이므로 2-3D로 정의하였다. 마지막 그림 1(f)는 지반의 형상도 3차원적으로 변하고 지진파의 전파도 공간상에서 이루어지므로 완전한 의미의 3차원 해석이라고 할 수 있다.

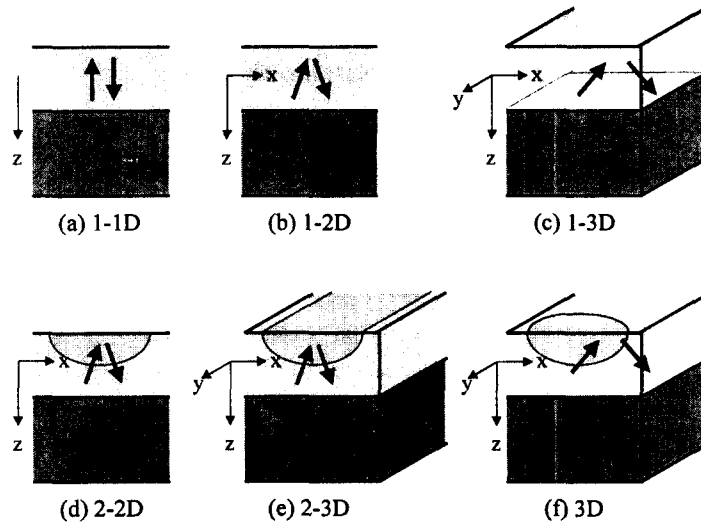


그림 1. 부지효과를 고려한 지진응답해석의 차원^[1]

부지응답해석에서 국지적인 지질조건이 지진이 발생한 동안 지반 거동에 크게 영향을 준다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다^[2]. 이러한 효과의 중요성은 1985년에 있었던 Michoacan 지진 동안 진앙으로부터 400km 떨어진 Mexico City에서 광범위하게 일어난 피해를 살펴볼 때 확연하게 나타난다. 지진으로 인한 피해는 호수 인근에 자리잡고 있는 구조물에 대하여 광범위했으나 연약한 지반 퇴적층 밖에서는 최소이거나 존재하지 않았다. 그 이후의 1988 Armenia, 1989 Loma Prieta, 1994 Northridge 그리고 1995 Hyogoken-Nambu (Kobe) 지진에서 지반 응답이 위치에 따라서 크게 달라짐으로서 이러한 중요성은 더욱 강조되었다. 특히 비슷한 규모의 지진인 Northridge 지진시에는 거의 피해가 없던 것에 비해 고베 지진때는 5000명이 넘는 인명피해와 2000억달러 이상의 직접적인 물질적 피해를 보았다. 이러한 사실은 고베지역에서 지진에 대한 대비가 부족했기 때문이 아니고 똑같은 규모임에도 지반조건에 따라 그 피해가 달라진 것이므로 부지효과에 대한 중요성을 잘 보여주는 단적인 예라 할 수 있다. 고베시에서 일어난 피해의 대부분은 소위 "disaster belt"라고 불리는 오사카 분지에서 1km 떨어진 곳에 위치한 1km 폭의 20km 길이의 좁은 지역에서 발생했다. 이러한 피해는 지진파의 전파와 부지효과 특별히 edge effect가 조합되어 그 belt에서 큰 지반 거동을 일으킨 것으로 알려지고 있다^[3]. 이와 같이 부지효과중에서 지반의 지질조건이 기하학적으로 변화하기 때문에 발생하는 영향은 1차원 해석기법으로는 예측이 불가능하므로 최소한 2차원 해석에 의해서 지표에서의 응답을 예측하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 2차원 평면상에서 파의 전파이론을 근거로 개발된 다층 반무한 기본해를 이용하여 2차원상에서 지진파의 전파를 효과적으로 예측할 수 있는 기법을 개발하였다. 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. 지반을 직접 모형화하는 직접법을 사용하였다. 이와 같은 방법을 사용하므로써 비교적 다양한 형상을 가지는 지반

의 모형화가 가능하게 되었다. 개발된 기법을 수직입사하는 지진에 대하여 상용프로그램의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였고, 분지형태의 퇴적층 지반에 적용하여 2차원 평면상에서 부지효과를 고려한 지진응답해석을 수행하였다. 단 본 연구는 2차원상에서의 지진응답해석을 통한 실용가능성을 판단하고자 함이며 추후에 좀더 집중적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

2. 지진응답 해석

지진 하중을 받는 지반-구조물의 상호관계를 나타내는 운동방정식을 유도하기 위해서는 다음의 그림 2와 같은 반무한 지반상에 근입된 구조물을 생각할 수 있다^[4]. 구조물은 그림에서처럼 이산화되고 지반과 구조물의 경계점에서는 하첨자 b 를 사용하고 구조물에서는 s 를 사용한다. 동적계는 실제 구조물과 굴착된 지반의 두 개의 부 구조계로 구성되어진다. 부 구조계의 차별화를 위하여 상첨자를 사용한다. 상첨자 s 는 구조물을 나타내며 상첨자 g 는 굴착된 지반을 나타낸다. 또한 굴착된 지반은 굴착이 안된 지반과 굴착된 지반으로 나타낼 수 있는데 이를 구별하기 위하여 상첨자 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 $[S_{ss}(\omega)]$, $[S_{sb}(\omega)]$, $[S_{bb}^s(\omega)]$ 로 구분할 수 있다.

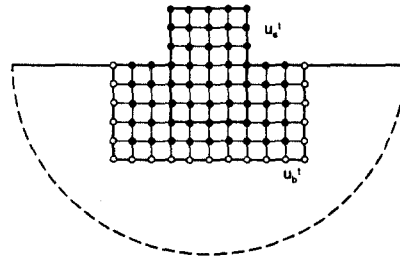


그림 2 지반-구조물 상호작용계

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

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

3. 내부영역과 외부영역의 정식화

외부영역의 경계요소해석을 위해서 다음과 같은 다층 반무한 평면에서의 동적 기본해를 사용하였다^{[5][6]}.

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

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.

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

여기서, c_{lk} 는 경계면의 기하학적 형상에 의해서 결정되는 상수이고, p_k 와 p_{lk}^* 는 각각 실제 하

중과 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.

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

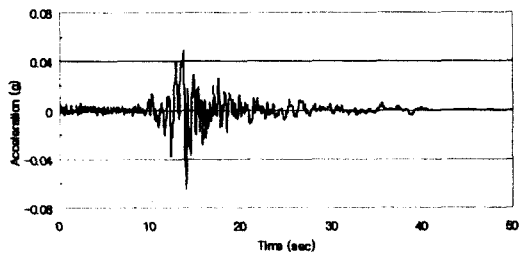
여기서, $[S^G]$ 는 조합된 전체 동적강성행렬이고 $\{u^G\}$ 는 조합된 전체 변위이며, $\{F^G\}$ 는 조합된 전체 외부 작용하중을 나타낸다.

4. 해석기법의 검증

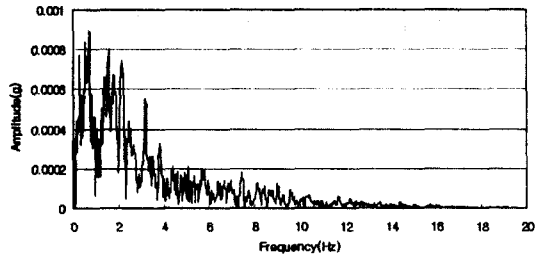
현재 부지응답해석에 가장 널리 사용되는 방법은 1차원 파전달이론에 근거하여 개발된 SHAKE^[7]를 이용하는 것이다. 따라서 본 연구기법의 타당성을 검증하기 위하여 대표적인 지반을 대상으로 지반 내에서 입사하는 지진파에 의한 지표면에서의 응답을 비교하였다. 대상지반의 입력물성은 표 1에 정리한 바와 같고 입력운동은 1989년 발생한 Loma Prieta 지진시 YERBA BUENA Island 에서 계측한 지진기록으로 최대 가속도는 0.07 g 이고 지속시간은 40 초 이다. 주 파수영역에서의 기록은 그림 3(a)와 같고 가속도 시간이력은 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



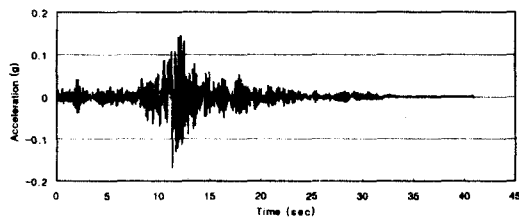
(a) 시간영역



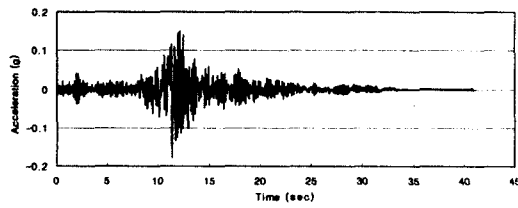
(b) 주파수영역

그림 3 1989년 Loma Prieta 지진기록

지하 16m 통제점에서의 입력운동에 의한 지표면에서의 시간영역 응답을 상용 프로그램인 SHAKE와 본 해석기법에 의해 수행한 결과는 그림 4와 같다. 상용 프로그램인 SHAKE 에 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 5와 같이 나타난다. 주파수 영역에서도 SHAKE 는 최대 응답 가속도가 0.00513g 가 나왔으나 본 연구에서는 0.00463g 로 나타나 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 시간영역에서나 주파수영역에서 최대 가속도 응답값이 전체적으로 미소한 차이를 보이는 것은 전술한 바와 같은 차이에서 비롯되는 것으로 판단된다. 그리고 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 얻을 수 있었다.

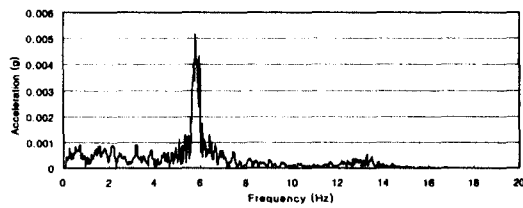


(a) SHAKE

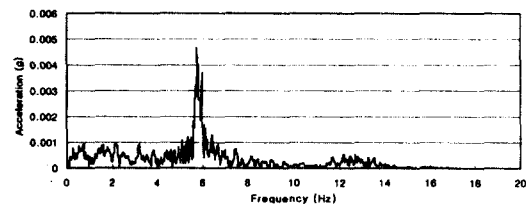


(b) 본 연구

그림 4 지표면에서의 시간영역 응답가속도



(a) SHAKE



(b) 본 연구

그림 5 지표면에서의 주파수영역 응답가속도

5. 부지효과를 고려한 지진응답해석

개발된 해석기법을 이용하여 분지형태의 퇴적층이 있는 지반에 대하여 수치해석을 수행하였다. 해석대상은 그림 6(a)와 같이 수평으로 30m, 깊이 10m의 퇴적층이 반원형태로 존재하는 가상의 지반을 고려하였다. 2차원 해석효과를 비교하기 위하여 동일한 물성의 지반이 수평층으로 존재하는 그림 6(b)와 같은 형태의 지반조건에 대한 해석도 수행하였다. 대상 지반의 물성은 다음의 표 2에 정리한 바와 같다. 지진하중의 입력은 지하 30m 기반암의 위치에서 입력하였고, 입력운동은 그림 3에서의 지진기록을 이용하였다. 해석결과는 그림 6(a)의 퇴적층이 끝나는 지점으로부터 원점까지의 시간영역응답의 최대값을 비교하였다. 그림 6(b)의 경우는 지표면의 모든점에서 동일한 응답이 나오므로 하나의 값을 비교하였다.

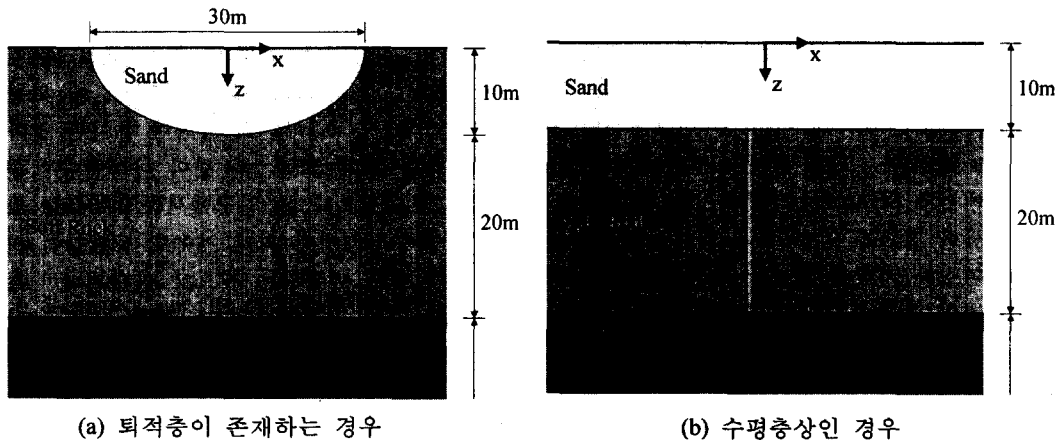


그림 6 부지효과를 고려한 해석대상지반

표 2 부지효과를 고려한 해석대상 지반의 물성

흙의 종류	전단파속도 (m/s)	밀도 (tf/m ³)	탄성계수 (kN/m ²)	포아송비	감쇠비
Sand	150	1.8	1,093,500	0.35	0.02
Soft Rock	300	2.0	4,680,000	0.30	0.02
Base Rock	1000	2.75	68,750,000	0.25	0.02

해석결과 지표면을 따라 변화하는 최대가속도 시간이력의 값은 그림 8에 제시한 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 원점에 가까워질수록 응답값의 차이가 크게 발생하며 퇴적층의 끝부분에서도 많은 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 원점의 경우 분지형지반에서는 최대가속도가 0.15 g가 발생한 반면 수평층상인 경우는 0.102 g에 불과하여 그 오차는 30%를 상회하는 것으로 나타났다. 이것은 국부적인 지진조사에 의한 지진응답의 예측이 얼마나 큰 차이를 수반할 수 있는지를 보여준다. 이러한 연구는 Bielak 등[2][3]에 의해 집중적으로 수행되었는데 그는 1988년의 Armenia 지진시 Kirovakan 이라는 지역에서 발생한 피해사례를 분석하여 수평방향으로 1.7Km에 이르고 최고 깊이 150까지 단단한 점토층이 존재하는 지역을 유한요소 모형을 이용하여 해석을 수행하였다. 해석결과 많은 부분에서 1차원 해석과 2차원 해석결과가 큰 차이를 보였으며 2차원 해석에 의한 결과는 edge effect를 반영하므로 1차원 해석결과에 비해 최대 50% 이상의 큰 값을 보이고 있다. Bielak 등은 광범위한 범위를 대상으로 한 수치해석을 위해 해석대상지반을 여러 부분으로 분할하여 각각을 병렬 Computing 기법으로 해석을 수행하였다. 따라서 본 연구의 결과

는 그와 같은 기존의 연구결과와 유사한 경향을 보이므로서 그 의미가 있다고 하겠다. 좀 더 정확한 해석을 위해서는 기존의 계측결과와 비교 검토하는 연구가 추후에 수행되어야 할 것으로 판단된다.

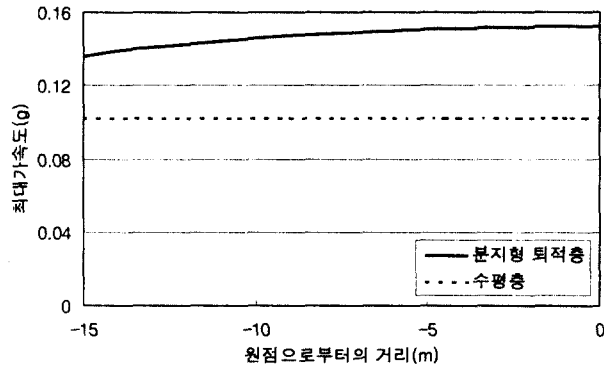
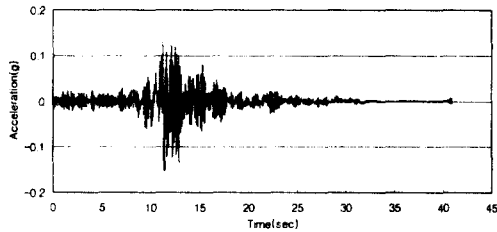
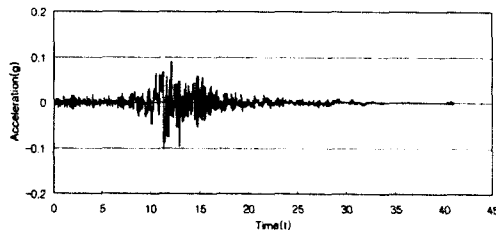


그림 8 해석대상에 따른 지표면상에서의 최대가속도 비교

다음으로 그림 7의 원점에서의 응답을 시간영역과 주파수 영역에서 비교하여 그림 9와 10에 각각 제시하였다. 시간영역에서의 결과는 그림 8에서도 제시한 바와 같이 응답값에서 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 주파수 영역에서의 결과를 보면 약 6Hz까지는 두 응답이 동일한 응답을 보이는 반면 이후의 값에서는 많은 차이를 보이고 있고, 특히 분지형 퇴적층이 존재하는 경우는 최대응답이 발생하는 주파수가 좀더 고주파수 쪽으로 이동하였고 그 응답또한 크게 증폭하는 것을 알 수 있다.

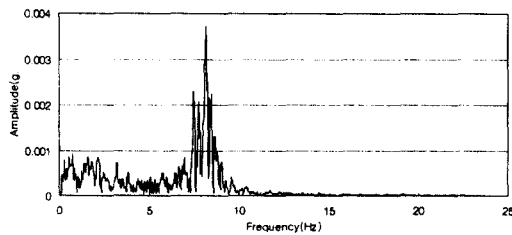


(a) 퇴적층이 존재하는 경우

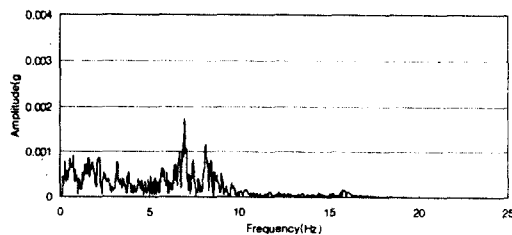


(b) 수평층상인 경우

그림 9 해석방법에 따른 원점에서의 시간영역응답



(a) 퇴적층이 존재하는 경우



(b) 수평층상인 경우

그림 9 해석방법에 따른 원점에서의 주파수영역응답

6. 결론

본 연구에서는 다층반무한 기본해를 이용하여 외부영역을 모형화하고 동적 유한요소를 사용하여 내부영역의 지반을 모형화하여 지진응답해석을 수행할 수 있는 2차원 평면에서의 해석기법을 개발하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 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.
- (2) 개발된 부지응답해석 기법의 타당성을 알아보기 위하여 수평층상지반에서 입사하는 지진에 의한 지표면에서의 응답을 상용프로그램의 결과와 비교하여 보았다. 해석결과 시간영역과 주파수 영역 모두에서 유사한 결과를 얻을 수 있었고 따라서 본 연구에서의 부지응답해석기법의 타당성을 확인할 수 있었다.
- (3) 부지응답해석에서 부지효과를 고려해 보기 위하여 동일한 지반물성을 가진 분지형 퇴적층을 가지고 있는 지반과 수평층지반에 대하여 부지응답해석을 수행하였다. 해석결과 분지형 퇴적층을 가진 지반에서의 응답이 큰 폭으로 증가하였고 이는 부지응답해석에서 2차원 효과가 상당히 크게 발생할을 알 수 있었다. 따라서 이와 같은 결론을 바탕으로 추후에 실제 지반조건을 고려한 2차원 부지응답해석에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 두뇌한국21 사업 핵심분야 사업의 지원에 의하여 수행된 연구의 일부로서 연구비를 지원해준 당국에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Hisada, y. and Yamamoto, S., Eleventh World Conference about Earthquake Engineering , Paper No. 2040, Acapulco, Mexico, 1996.
2. Bielak, J, Xu, J., and Ghattas, O., Earthquake Ground Motion and Structural Response in Alluvial Valleys," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 5, May, 1999, pp.413-425.
3. Bielak, J, Hisada, Y., Bao, H., Xu, J., and Ghattas, O., "One- vs Two- or Three-Dimensional Effects in Sedimentary Valleys," 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2689, Auckland, Australia, 2000.
4. Wolf, J.P., *Dynamic Soil-Structure-Interaction*, Prentice-Hall, 1985.
5. 김문겸, 이종우, 이필규, 김민규, "점근해를 이용한 동적 2차원 다층 반무한 경계요소," 대한 토목학회 논문집, 제 18권, 제 1-5 호, pp. 625-636, 1998. 9.
6. 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.
7. 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.