

2003 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

경계요소법을 이용한 지반-구조물 상호작용 해석기법의 적용성 연구

**A Study of Applicability of Soil-Structure Interaction Analysis Method
using Boundary Element Method**

김민규

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

김문겸

연세대학교 토목공학과

서울 서대문구 신촌동 134

요 약

본 연구에서는 2차원 평면상에서 개발된 다층 반무한 기본해를 이용하여 경계요소법에 적용하고 유한요소로 모형화한 근역지반을 조합한 지반-구조물 상호작용 해석기법을 개발하였다. 개발된 해석기법의 검증은 위하여 적용된 다층 반무한 해를 Estorff 등의 연구 결과와 비교하여 검증하였으며, 기본해를 이용하여 개발된 지반-구조물 상호작용해석기법의 검증은 위하여 자유장해석을 수행하였다. 자유장 해석결과는 1차원 파전달 이론에 의하여 개발된 자유장응답해석 프로그램인 SHAKE의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 개발된 해석기법을 이용하여 특성이 다른 지진파에 의한 2차원 평면상의 지반-구조물 상호작용해석을 수행함으로써 각 지진파에 따른 지반-구조물 상호작용효과를 제시하였다.

ABSTRACT

In this study, a numerical method for Soil-Structure Interaction (SSI) 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 and coupled with near field modeled by finite elements. In order to verify the seismic response analysis, the results are compared with those of other commercial code. Finally, several SSI analyses which induced seismic loading are performed to examine the dynamic behavior of the system. As a result, it is shown that the developed method can be an efficient numerical method for solving the SSI analysis.

1. 서론

국내에서 내진설계의 중요성이 대두된 것은 1995년 일본의 고베지진 이후이고 그 이후 내진설계에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 모든 구조물중에서 가장 중요도가 높은 원전 구조물은 국내의 내진설계 기준이 수립되기 이전부터 외국의 기준을 준용하여 엄격한 내진설계가 이루어져 왔다. 국내에도 내진설계가 필요한가에 대한 논란은 이제는 진부한 느낌마저 들고 있는 실정이다. 실제로 기상청자료를 보면 최근에 국내에도 지진의 발생추이가 점점 증가하는 것을 알 수 있다.(그림 1) 여기서 주목해야 할 것은 지진의 발생빈도가 증가하는 것 뿐만 아니라 구조물의 손상을 일으킬 수 있는 지진 규모라고 알려져 있는 규모 5.0 이상의 지진이 매년 발생하고 있다는 점이다. 따라서 지진으로 인하여 발생하는 조그만 손상이라도 주변에 막대한 피해를 입힐 수 있는 원전구조물의 경우는 모든 가능한 경우를 고려한 내진검토가 이루어져야 함은 재론의 여지가 없는 듯 하다.

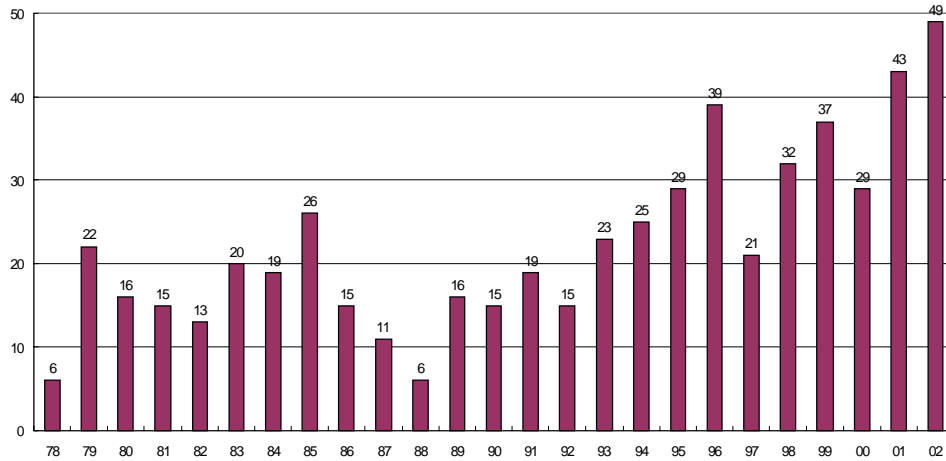


그림 1. 연도별 국내 지진 발생현황^[1]

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/sec 이하인 비교적 연약한 경우에는 지반-구조물 상호작용효과는 반드시 고려하여야 할 문제인 것으로 판단된다^[2]. 국내의 경우 원전의 의존도가 모든 전력생산에서 가장 중요한 비중을 차지하고 있는 만큼 차후에는 기존과 같은 좋은 암반부지를 선정하지 못할 경우 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 원전구조물의 내진 안전성 검토는 반드시 필요한 연구인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 2차원 평면상에서 개발된 주파수 영역 다층 반무한 기본해를 경계요소법에 적용하여 대상구조물과 비교적 멀리 떨어진 원역지반을 모형화 하고 근역지반은 유한요소로 모형화 하여 그 경계에서 조합함으로써 2차원 평면상에서 적용할 수 있는 지반-구조물 상호작용해석법을 개발하였다. 개발된 기법을 일반적인 구조물에 적용하여 지반-구조물 상호작용 해석을 수행함으로써 원전구조물에도 적용가능한 수치해석기법의 개발을 목표로 하였다.

2. 지반-구조물 상호작용 해석 및 지진하중

2.1 지진응답해석

지반-구조물 상호작용해석을 수행하기 위하여 선행되어야 할 것이 정확한 부지응답을 산정하는 일이다. 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^[3]는 부지응답해석의 방법을 해석차원에 따라 그림 2와 같이 구분하였다. 기존에 부지응답해석을 위해서 가장 널리 쓰이는 방법은 1차원 파 전달 이론에 기초해서 개발된 그림 2(a)와 같은 형태의 해석방법이다. 이 방법은 이상적인 상태에서의 정해를 구할수 있고 해석시간이 매우 적게 걸린다는 장점이 있는 반면 2차원적인 지반조건을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 2차원적인 지반조건을 고려하고 해석의 효율성을 추구한다는 측면에서 그림 2(b) 및 (d)와 같은 조건을 고려할 수 있는 2차원 평면상 지진응답해석기법을 개발하고자 한다.

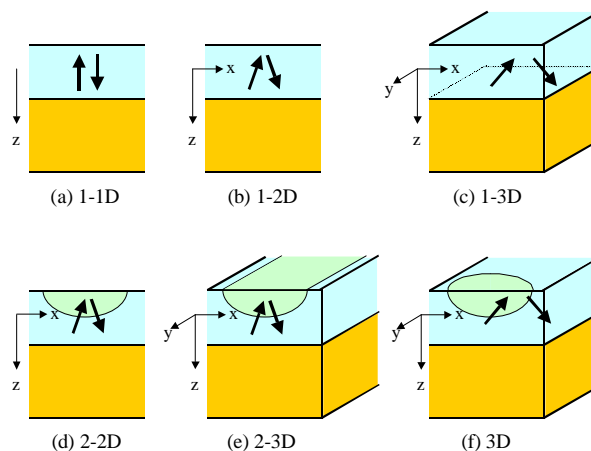


그림 2. 부지효과를 고려한 지진응답해석의 차원^[3]

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 사용함으로써 반무한 평면에서의 방사조건을 만족시킬 수 있도록 하였고, 지표면에 가까운 지반을 내부영역으로 정의하여 유한요소로 모형화 함으로써 근역지반의 기하학적인 형상을 모형화할 수 있도록 하였다. 지반을 직접 모형화하는 직접법을 사용하였다. 이와 같은 방법을 사용함으로써 비교적 다양한 형상을 가지는 지반의 모형화가 가능하게 되었다. 개발된 기법을 수직입사하는 지진에 대하여 상용프로그램의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였고, 이후 두가지 지진파를 이용한 지반-구조물 상호작용 해석에 적용함으로써 경계요소법을 이용한 지반-구조물 상호작용해석기법의 적용성을 보였다.

2.2 지반-구조물 상호작용 해석법

단층활동과 같은 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 반무한영역으로 가정할 수 있는 지반이 서로 상호작용하며 운동하는 현상을 지반-구조물 상호작용이라고 한다^[4]. 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 Fourier 변환하여 구하게 된다. 이 경우 해석은 선형해석에 국한되며 구조물과 지반의 비선형성은 등가선형화기법을 이용하여 근사적으로 고려할 수 있다^[5,6]. 본 연구에서는 이와 같은 지반-구조물 상호작용 해석의 특성을 반영하기 위하여 주파수영역에서 개발된 다층 반무한 기본해를 이용하여 지반-구조물 상호작용 해석기법을 개발하였다.

2.3 지진하중

지진으로 기인한 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^[7].

1. single shock - 이러한 형태의 거동은 진앙으로부터 짧은 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 띄고 모든 방향에서 거의 동일한 강도(severity)를 가진다.
3. Long ground motions exhibiting pronounced prevailing periods of vibration - 진앙으로부터

중간정도의 거리에 떨어진 지진중에서 지진이 연약지반을 통과하면서 filtering 된 결과로서 발생한다.

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

최근 들어 Kobe지진 발생후에 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. 유한요소-경계요소의 정식화

3.1 외부영역의 경계요소해석

다층 반무한 평면에서의 동적 기본해는 다음과 같다^[8,9].

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

여기서, C_n 은 파동수 k 에 독립적인 상수이고 z^* 및 x^* 는 각각 수진점과 가진점간의 수직거리 및 수평거리이다.

변위성분 및 응력성분은 최종적으로 식 (2)와 같이 점근해가 변위의 동적해와 일치하는 구간까지 수치적분을 수행하고 그 이상의 구간에 대해서는 점근해의 이론적분값을 이용할 수 있다.

$$u_{pq}^{\ell}(\omega, x, z, z_S) = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-a}^{+a} \{(\mathcal{D}_{nq}^j) e^{-ikx^*}\} dk + \int_{-\infty}^{-a} \{(\mathcal{D}_{nq}^j) e^{-ikx^*}\} dk + \int_{+a}^{+\infty} \{(\mathcal{D}_{nq}^j) e^{-ikx^*}\} dk \right] \quad p, q = x, z \quad (2)$$

점근식의 피적분항은 지수적으로 감쇠하는 $e^{-k(z-ix)}$ 의 항을 포함하고, 깊이 z 의 함수이며, 파동수가 증가함에 따라 발산하는 항을 포함하지 않으므로 점근식에 대해 무한 Fourier 적분을 수행하면 식 (3)과 같은 형태의 적분식이 되고 각각의 무한 적분 이론해를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2\pi} \int [(\mathcal{D}_{nq}^j) e^{-ikx^*}] dk = \frac{A_n}{2\pi} \int [k^n e^{(-kz^* - ikx^*)}] dk \quad (3)$$

여기서, A_n 은 파동수 k 에 독립적인 상수이고 z^* 및 x^* 는 각각 수진점과 가진점간의 수직거리 및 수평거리이다.

식 (4)는 영역 Ω , 경계 Γ 로 이루어진 다층반무한 구조계에서 Ω 영역 내 임의의 한 점 F 에서의 응력 평형방정식을 응력텐서 σ_{kj} , 물체력 b_k 와 변위 u_k 를 이용하여 나타낸 것이며, 가상일의 원리에 의해서 적분방정식을 형성하면, 식 (5)와 같은 체적적분방정식이 구해진다.

$$\sigma_{kj,j} + \rho b_k - \rho \ddot{u}_k = 0 \quad (4)$$

$$\int_{\Omega} \sigma_{kj,j} u_k^* d\Omega + \int_{\Omega} \rho b_k u_k^* d\Omega - \int_{\Omega} \rho \ddot{u}_k u_k^* d\Omega = 0 \quad (5)$$

여기서, u_k^* 는 영역 Ω 에서 정의되는 응력 σ_k^* 와 물체력 b_k^* 하의 가상의 단위 동하중에 의한 변위이다. 만약 물체력이 고려되지 않는 경우, 특이점의 영향을 고려한 구조계의 직접 경계적분방정식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{lk} u_l + \int_{\Gamma} p_{lk}^* u_k d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{lk}^* p_k d\Gamma + \int_{\Omega} u_{lk}^* \rho \chi_k d\Omega \quad (6)$$

여기서, c_{lk} 는 경계면의 기하학적 형상에 의해서 결정되는 상수이고, p_k 와 p_{lk}^* 는 각각 실제 하중과 가상의 단위동하중에 의한 경계면 Γ 에서의 표면력이며, χ_k 는 물체력을 나타낸다. 본 연구에서는 기본해에 물체력의 영향을 포함하므로 식 (6)의 영역적분항은 없어지게 된다. 이산화된 요소사이에 모서리점이 포함되는 경우 표면력의 불연속이 발생될 수 있으므로 이 절점을 중복시켜서 풀어야 한다. 즉, 2 개의 요소의 사이에서 앞부분의 절점과 뒷부분에서의 절점으로 나눈다. 그러나 변위는 일정하여야 하므로 절점을 중복시킬 필요가 없다. 이 식을 이용해 전체 절점에 대하여 행렬을 구성하면 식 (7)과 같다.

$$[H^{BE}] \{u^{BE}\} = [G^{BE}] \{p^{BE}\} \quad (7)$$

여기서, 절점의 수가 N 이고 요소의 수가 NE 라면 행렬 $[H^{BE}]$ 와 $[G^{BE}]$ 는 면내운동의 경우 각각 $2N \times 2N$ 의 차원과 $2N \times 2NE$ 의 차원을 형성하며 면외운동의 경우는 각각 $N \times N$ 의 차원과 $N \times NE$ 의 차원을 이룬다. 절점 당 지지항과 미지항의 수는 같으므로 식 (7)은 다원 일차 연립방정식의 형태로 표현되며 다시 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[A^{BE}] \{X^{BE}\} = \{F^{BE}\} \quad (8)$$

여기서, $[A^{BE}]$ 는 $[H^{BE}]$ 와 $[G^{BE}]$ 를 이용하여 구성한 행렬이고, $\{X^{BE}\}$ 는 미지의

변위와 하중의 벡터이며, $\{F^{BE}\}$ 는 기지의 변위와 하중에 대한 벡터이다. 그러므로 행렬식 (8)에 대한 해를 구하여 경계요소해석을 수행할 수 있다.

3.2 유한요소를 이용한 내부영역의 정식화

전체계의 동적 운동방정식은 행렬형태로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{\bar{u}}\} + [C]\{\dot{\bar{u}}\} + [K]\{\bar{u}\} = \{\bar{F}\} \quad (9)$$

여기서, 벡터 $\{\bar{u}\}$, $\{\dot{\bar{u}}\}$ 와 $\{\ddot{\bar{u}}\}$ 는 각각 변위, 속도와 가속도를 나타내며, 행렬 $[M], [C]$ 와 $[K]$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬 그리고 정적강성행렬을 나타낸다. 그리고 벡터 $\{\bar{F}\}$ 는 내부영역에 가해진 하중벡터를 나타낸다. 식 (9)를 시간변수에 대해 Fourier 변환을 수행하면 시간의 함수인 하중벡터 $\{\bar{F}\}$ 및 변위벡터 $\{\bar{u}\}$ 는 식 (10)과 같이 표현된다. 변위와 하중벡터의 bar는 시간영역을 구분하기 위하여 표시한 것이다.

$$\{u(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{u}(t)\} \exp\{-i\omega t\} dt \quad (10a)$$

$$\{F(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{F}(t)\} \exp\{-i\omega t\} dt \quad (10b)$$

그러므로 식 (9)는 식 (11)과 같이 주파수영역에서의 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[S(\omega)]\{u(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (11)$$

식 (11)에서 $[S(\omega)]$ 는 임피던스행렬로서 식 (12)와 같이 표현되는 동적강성행렬을 나타내며 $[K^*]$ 는 정적강성행렬을 나타낸다.

$$[S(\omega)] = [K^*] + i\omega[C] - \omega^2[M] \quad (12)$$

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 (13)과 같이 유한요소의 형태로 나타낼 수 있다.

$$[[S^{FE}] + [S^{BE}]]\{\{u^{FE}\} + \{u^{BE}\}\} = \{\{F^{FE}\} + \{F^{BE}\}\} \quad (13)$$

이로부터 전체 동적강성행렬과 하중형태로 나타내면 식 (13)은 식 (14)와 같이 된다.

$$[S^G]\{u^G\} = [F^G] \quad (14)$$

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

4. 동적 경계요소해석의 검증

본 연구방법의 타당성 검증을 위한 검증 대상으로서 기반암위에 적층된 균일 지반에 대한 문제를 다루었다. 해석 대상의 형태는 그림 3에 나타낸 바와 같으며, 기반암에 적층된 상부 균일지층의 탄성계수는 266MPa, 포아송비는 0.33, 밀도는 2000kg/m³으로 하였다. 이때 기존의 estorff 등^[10]의 방법은 기반암을 모형화하기 위해 고정된 경계조건을 이용하여 그 해를 구하였지만 본 연구에서는 개발된 다층반무한 기본해를 이용하여 경계조건을 사용하지 않고 강성이 매우 큰 반무한 기반암으로 모형화하여 그 해를 구하였다.

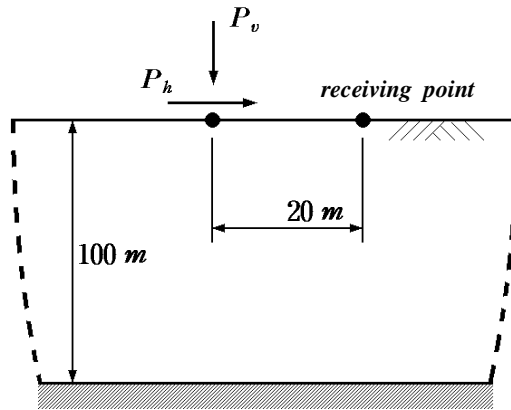
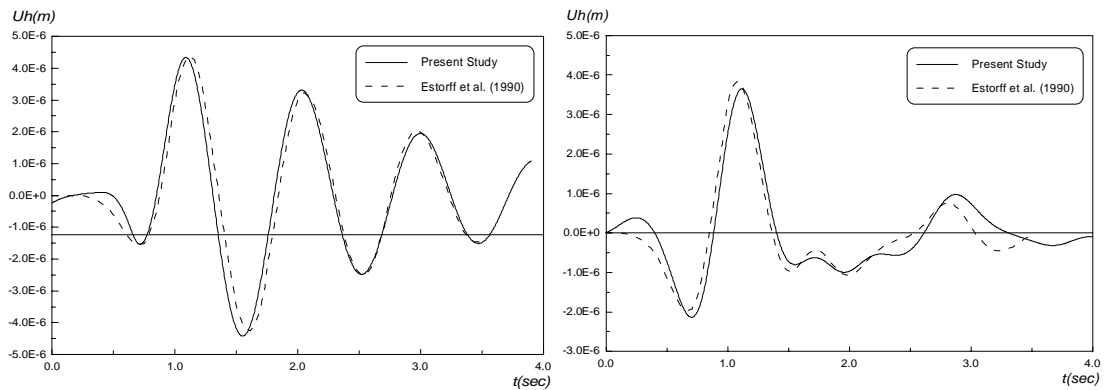


그림 3. 기반암위에 적층된 균일지반

해석결과는 그림 4에서 제시한 바와 같이 기존의 경계요소 해석결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이로부터 본 연구방법의 타당성을 입증할 수 있었다.



(a) 수직하중에 의한 수직 응답

(b) 수평하중에 의한 수평 응답

그림 4. 해석결과의 비교

일반적으로 경계요소법은 다양한 물성을 포함하는 다영역 문제 및 복잡한 기하학적 성질을 갖는 해석대상 구조계를 해석하는 데에는 많은 문제점 및 어려움이 따르므로 해석대상구조물 주변을 유한요소로 모델링하고 방사조건을 만족하는 외부영역을 본 경계요소법으로 모델링하여 조합해석할 경우, 더욱 다양한 구조물에 대해 효과적인 해석을 수행할 수 있다.

5. 자유장응답해석기법 검증

현재 부지응답해석에 가장 널리 사용되는 방법은 1차원 파전달이론에 근거하여 개발된 SHAKE^[11]를 이용하는 것이다. 따라서 본 연구기법의 타당성을 검증하기 위하여 임의의 지반을 대상으로 지반 내에서 입사하는 지진파에 의한 지표면에서의 응답을 비교하였다. 해석대상지반은 그림 5와 같은 균질 다층 반무한 지반을 대상으로 하였다. 대상지반의 입력물성은 표 1에 정리한 바와 같고 입력운동은 1989년 발생한 Loma Prieta 지진시 YERBA BUENA Island 에서 측정한 최대 가속도는 0.07g 이고 지속시간은 40 초인 기록을 사용하였다. 가속도 시간이력과 주파수영역에서의 기록은 그림 6(a) 및 그림 6(b)와 같다.

표 1. 지진응답 비교에 사용된 지반물성

층의 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
Gravel 3	476	2.42	1,612,042	0.3	0.02

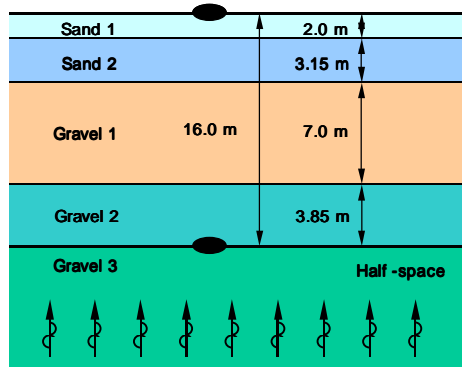


그림 5. 본 연구의 검증에 사용된 지반

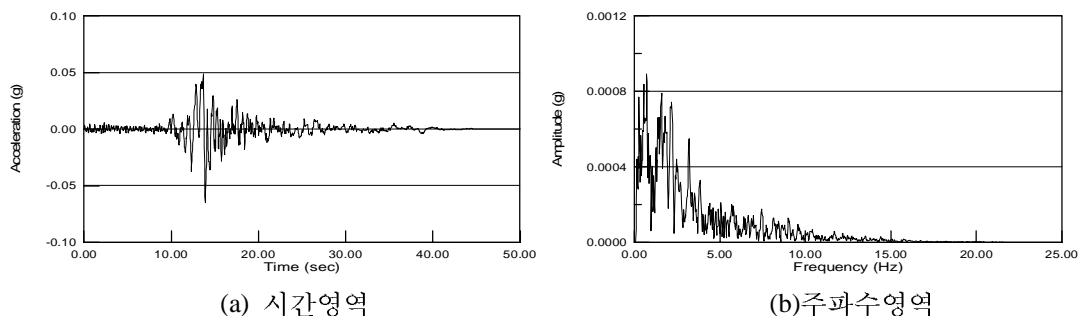
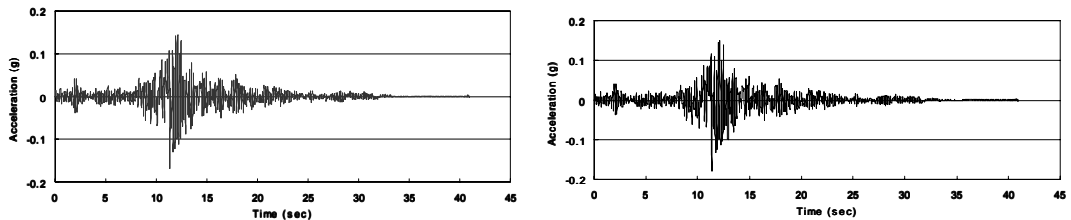


그림 6. 1989년 Loma Prieta 지진기록

그림 5에 제시된 바와 같은 지하 16m 통제점에서의 입력운동에 의한 지표면에서의 시간영역 응답을 상용 프로그램인 SHAKE와 본 해석기법에 의해 수행한 결과는 그림 7과

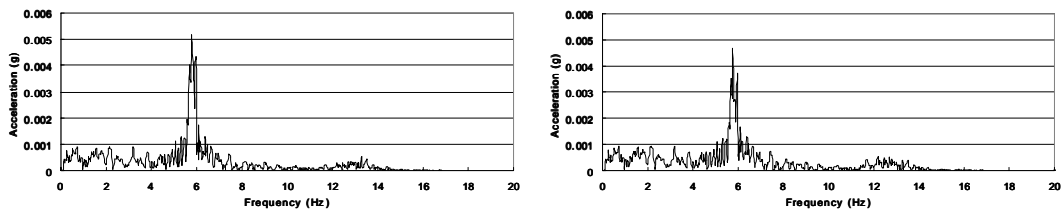
같다. 상용 프로그램인 SHAKE 에 의한 응답 최대 가속도는 0.177g 이며 본 연구에서의 응답 최대 가속도는 0.171g 로 나타나 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 주파수 영역에서의 결과를 비교하여 보면 그림 8과 같이 나타난다. 주파수 영역에서도 SHAKE 는 최대 응답 가속도가 0.00513g 가 나왔으나 본 연구에서는 0.00463g 로 나타나 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 시간영역에서나 주파수영역에서 최대 가속도 응답값이 전체적으로 미소한 차이를 보이는 것은 해석방법의 차이에 의해서 비롯되는 것으로 판단된다. 그리고 전반적인 응답의 형상이 유사한 반면 최대값에서는 Shake의 결과보다 다소 작은 값을 보이는 것은 Shake의 해석은 1차원문제이므로 본 연구에서 수행한 2차원 평면변형을 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.



(a) SHAKE

(b) 본 연구

그림 7. 지표면에서의 시간영역 응답가속도



(a) SHAKE

(b) 본 연구

그림 8. 지표면에서의 주파수영역 응답가속도

6. 지반-구조물 상호작용 해석

6.1 해석대상구조

본 연구에서 개발한 해석기법을 이용하여 지반-구조물 상호작용해석을 수행하였다. 해석대상은 그림 9에서 보는 바와 같이 임의의 지반-구조물 상호작용 시스템을 선정하였으며, 각 요소 및 지반의 물성은 표 2에 나타난 바와 같다. 해석 대상시스템은 암반상에 10m의 모래질 층이 덮여있는 가사의 지반을 선정하였으며 그 위에 기초와 상부구조물이 놓여있는 것으로 하였다. 지반과 기초 및 상부구조물은 모두 평면변형률 요소로 모형화 하였다.

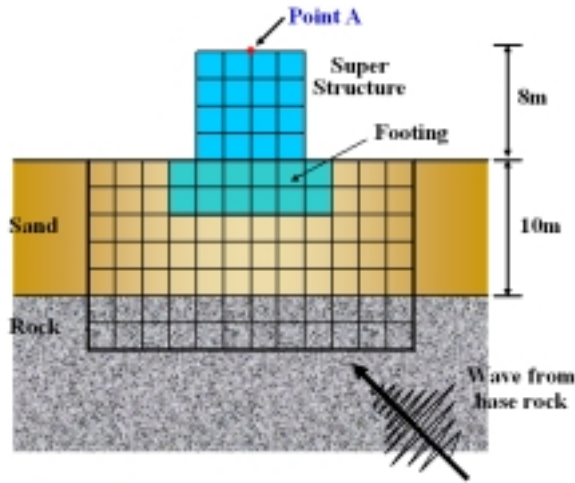


그림 9. 해석대상 지반-구조물 상호작용 시스템

표 2. 해석 대상 구조계의 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
구조물	-	-	3,000	20×10 ⁶	0.3	0.025

6.2 강제진동해석

지반-구조물 상호작용해석을 위해서 선정된 임의의 시스템에서의 공진주파수 영역을 분석하기 위하여 상부구조물에 주파수별 단위 횡방향 조화하중을 가하여 그림 9의 Point A에서의 응답을 관측해 보았다. 해석결과는 다음의 그림 10에 제시한 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 27Hz 까지의 자유진동해석결과 4Hz에서 공진주파수가 발생하는 것으로 나타났고 이후에는 두드러진 peak 없이 감쇠하는 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 시스템에 대한 지진응답해석을 수행할 경우 지진의 주파수 특성에 따라 동일 PGA의 지진이라 할 지라도 응답의 차이가 크게 발생할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

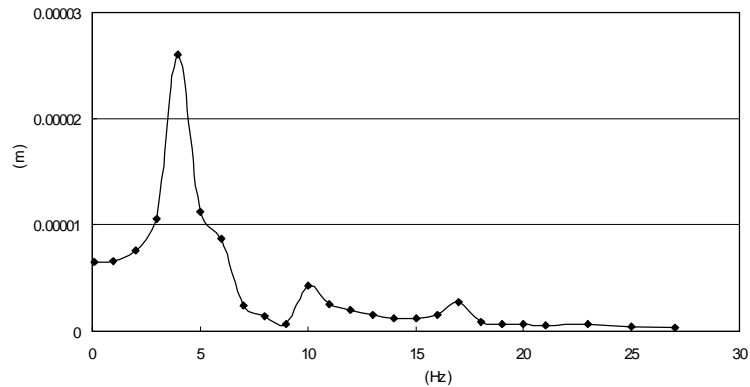


그림 10. 지반-구조물 상호작용 시스템에 대한 강제진동해석결과

6.3 지진응답해석

해석에 사용된 지진은 단주기 특성을 가지는 Nahanni 지진과 장주기 특성을 가지는 Imperial valley 지진을 사용하였다^[12,13]. Nahanni 지진은 1985년 12월 미국 동부에서 발생한 지진으로 1.1g의 최대지반가속도를 가지는 단주기 특성을 가지는 지진으로서 본 연구에서는 x방향 수평성분 지진기록을 이용한 해석을 수행하였다. Imperial Valley 지진은 미국서부에서 1979년에 발생한 지진으로서 본 연구에서는 Array No.5에서 측정된 지진기록 중 x방향 수평성분의 시간이력을 이용하여 해석에 이용하였다. 최대지반가속도는 0.38g이다. 각각의 지진기록은 정량적인 해석결과의 비교를 위하여 그림 11에 나타낸 바와 같이 최대지반가속도(PGA)를 0.2g로 조정하여 해석에 사용하였다. 응답스펙트럼은 그림 12에서 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수대별로 응답스펙트럼의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

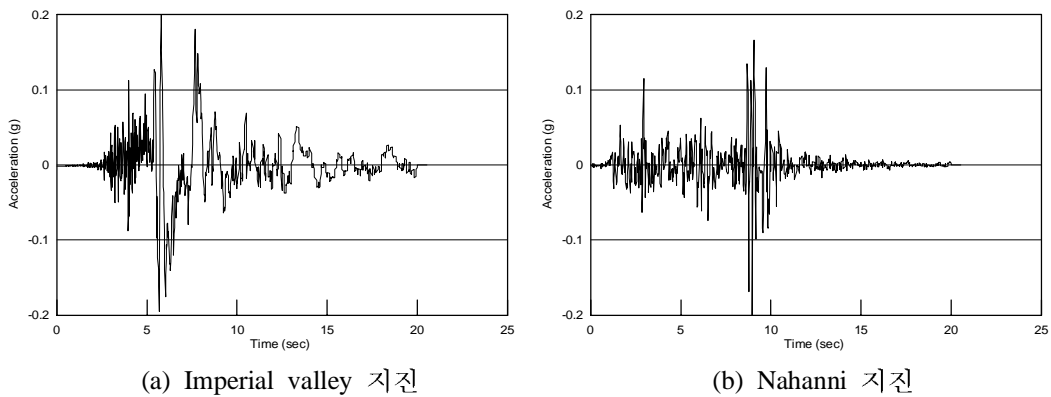


그림 11. 지반-구조물 상호작용 해석에 사용한 입력지진의 가속도 시간이력

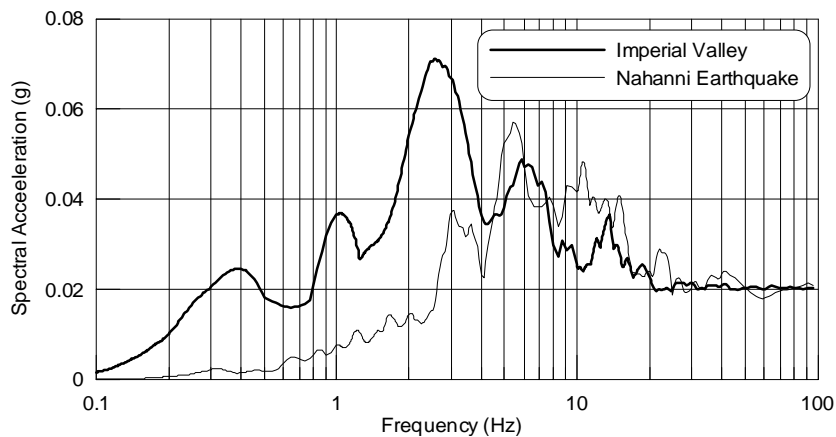


그림 12. 입력지진의 가속도 응답스펙트럼비교

해석결과는 그림 9의 Point A에서의 응답을 살펴보았다. 각 지진에 따른 Point A에서의 응답 가속도 시간이력은 다음의 그림 13에 제시한바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 PGA를 사용했음에도 응답의 최대가속도는 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있

다. 각 응답의 응답스펙트럼은 그림 14에서 비교하였다. 그림 13과 14에서 보는 바와 같이 동일한 PGA를 사용하고 입력지진의 응답스펙트럼에서는 Imperial Valley 지진의 값이 상대적으로 더 큰 값이었음에도 불구하고 구조물 상단에서의 응답은 Nahanni 지진에 의한 응답이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 지반을 포함한 해석대상 시스템의 공진영역에 따라서 동일한 크기의 지진에 의한 응답이 큰 폭으로 달라질 수 있음을 보인 것으로 지반-구조물 상호작용 효과가 구조물의 지진응답에 큰 영향을 미침을 알 수 있는 것이다.

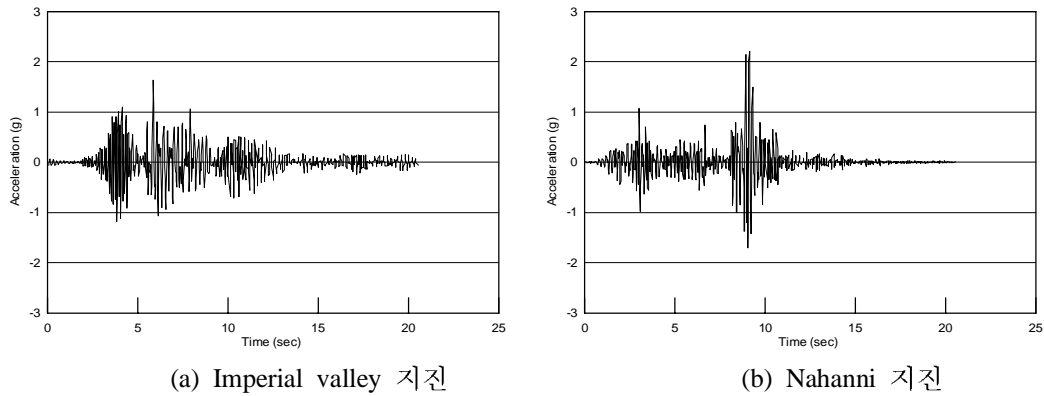


그림 13. 구조물 상단에서의 응답 가속도 시간이력

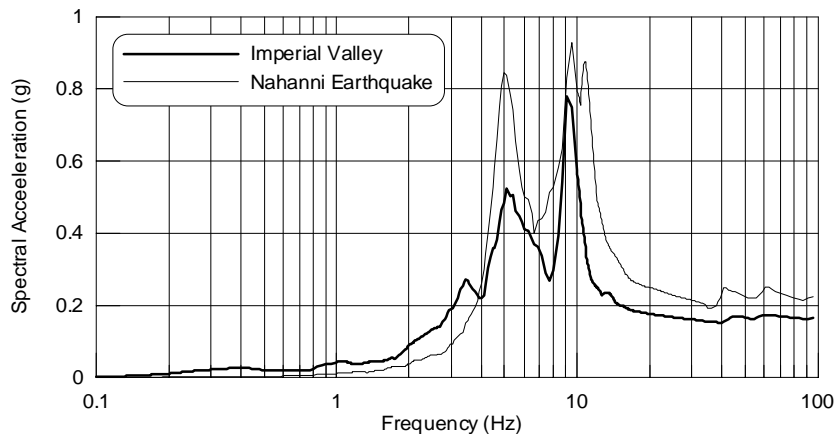


그림 14. 응답스펙트럼 결과 비교

7. 결론

본 연구에서는 다층반무한 평면상에서 개발된 기본해를 이용하여 경계요소법에 적용함으로써 2차원 평면상에서의 지반-구조물 상호작용해석기법을 개발하고 그것을 임의의 지반-구조물 상호작용시스템에 적용하여 지진응답 해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다층반무한 평면상에서 개발한 기본해를 이용하여 경계요소법에 적용함으로써 다층지

반상의 동적해석을 수행할 수 있도록 하였다. 개발된 기법을 기반암 위에 적층된 균일 지반에 적용하여 해석을 수행하고 그 결과를 Estorff 등의 연구결과와 비교함으로써 본 연구에서 적용한 경계요소법에 대한 검증은 수행하였다. 해석결과 본 연구의 결과와 비교대상으로 삼은 Estorff 등의 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 따라서 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.

2. 개발된 동적 유한요소-경계요소 조합기법을 이용한 지진응답해석기법의 타당성을 검토하여 보기 위하여 구조물이 존재하지 않는 다층반무한 지반상에서 기반암으로부터 전파되는 지진파에 의한 지표면에서의 응답을 실무에서 널리 사용하고 있는 상용프로그램의 결과와 비교하여 보았다. 비교결과 상용프로그램의 결과와 비교적 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 따라서 본 연구에서 제안한 지진응답해석기법의 타당성을 검증할 수 있었다.
3. 개발된 기법을 이용하여 지진에 의한 지반-구조물 상호작용해석을 수행하였다. 해석결과 본 연구기법을 이용하여 지반으로부터 전파되는 지진하중에 의한 지진응답해석을 효과적으로 수행할 수 있음을 보였으며, 부지효과를 고려한 지진응답을 구할 수 있으므로 차후의 여러 구조물에 대한 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 지진응답해석을 수행할 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr/>.
2. 이종립, 연관희, 허택영, (1995), **원전구조물의 지반-구조물 상호작용 해석기법 개선**, '99 전력연-단162, 한국전력공사 전력연구원.
3. Hisada, Y. and Yamamoto, S. (1996), *Eleventh World Conference about Earthquake Engineering*, Paper No. 2040, Acapulco, Mexico.
4. Wolf, J.P. (1985), *Dynamic Soil-Structure-Interaction*, Prentice-Hall.
5. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
6. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970), *Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*, Report No. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
7. Ersoy, S, Ala Saadeghvaziri, M., Liu, G.U. and Mau, S.T., (2001), "Analytical and Experimental Seismic Studies of Transformers Isolated with Friction Pendulum System and Design Aspect," *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 4, pp.569-595.
8. Kim, Moon Kyum, Lim, Yun Mook and Rhee, Jong Woo. (2000), "Dynamic Analysis of Layered Half Planes by Coupled Finite and Boundary Elements," *Engineering Structures*, Vol.22, No.6, pp. 670-680.
9. Kim, Moon Kyum, Lim, Yun Mook, Kim, Min Kyu and Cho, Seok Ho. (2001), "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.

10. Von estorff, O., Pais, A.L. and Kausel, E. (1990), "Some Observation on Time Domain and Frequency Domain Boundary Elements," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 29, pp. 785-800.
11. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972), *SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response of Horizontally Layered Sites*, Report No. EERC/72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.
12. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철 (1997), "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(I) : 암반지반 조건," *한국지진공학회 논문집*, 제1권 제 4호, pp. 11-20.
13. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철 (1997), "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(II) : 연약지반 조건," *한국지진공학회 논문집*, 제1권 제 4호, pp. 21-28.