

동적 무한요소를 이용한 3차원 지반-구조물 상호작용계의 지진응답해석

Seismic Response Analysis for Three Dimensional Soil-structure Interaction System using Dynamic Infinite Elements

서춘교¹⁾ · 류정수²⁾ · 김재민³⁾

Seo, Choon-Gyo · Ryu, Jeong-Soo · Kim, Jae-Min

국문 요약 >> 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용을 고려한 3차원 지반-구조계의 지진응답 해석을 수행하고 그 기법의 적용성과 타당성을 검토한다. 이를 위해 구조물과 구조물 주변의 근역지반을 3차원 유한요소로서 모델링하고 원역지반에 대해서는 기 개발한 3차원 동적 무한요소를 적용한다. 모든 입사 성분 P, SV 그리고 SH파가 고려되었을 때, 등가 지진하중은 무한요소에 의해 구해진 무한 지반의 동적 강성과 자유장 해석을 통해 구해진 지반의 응력과 변위응답을 이용하여 구해진다. 검증 및 적용 예제는 적층 자유장의 지반응답해석과 전형적 원자로 격납건물의 지반-구조물 상호작용을 고려한 층응답 스펙트럼을 구하는 것으로 하였다. 해석 결과는 다른 기법에 의해 구해진 값들과 비교하였으며, 본 기법의 정확성과 정밀성을 확인할 수 있다.

주요어 3차원 동적 무한요소, 지반-구조물 상호작용, 지반응답해석, 원자로 격납건물

ABSTRACT >> This paper presents a seismic analysis technique for a 3D soil-structure interaction system in a frequency domain, based on the finite element formulation incorporating frequency-dependent infinite elements for the far field soil region. Earthquake input motions are regarded as traveling P, SV and SH waves which are incident vertically from the far-field soil region, and then equivalent earthquake forces are calculated using impedances of infinite soil by dynamic infinite elements and traction and displacement from free field response analysis. For verification and application, seismic response analyses are carried out for a multi-layered soil medium without structure and a typical nuclear power plant in consideration of soil-structure interaction. The results are compared with the free field response using a one-dimensional analytic solution, and a dynamic response of an example structure from another SSI package.

Key words three dimensional dynamic infinite elements, soil-structure interaction, site response analysis, nuclear containment structure

1. 서론

지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction: SSI)을 고려한 지진응답해석은 초대형 인프라 구조물이나 초고층 빌딩, 원자력 구조물 등 정치 사회적으로 중요한 구조물에 대한 정밀한 지진해석이 요구될 때 한정적으로 수행되어 왔다. 그러나 최근에 이르러서는 중대형 교량이나 엄밀 지진

해석이 필요한 주요 건축 구조물의 설계에까지 응용 빈도가 증가하고 있는 추세에 있다. 그 이유는 구조물 기초의 동적 응답이 지진의 특성과 구조물 동특성 외에도 지반과 구조물 간의 동적 상호작용 효과에 큰 영향을 받는다는 인식의 확장이라 할 수 있을 것이다.

지반-구조물 상호작용을 고려한 해석기술은 지난 40여년 동안 연산기술의 첨단화와 함께 지속적으로 발전하여 왔다. 이 복잡한 상호작용계 해석의 핵심은 외부 무한영역에 대한 수치적 모형화 기법이라 할 수 있다. 과거 많은 연구자들이 점성경계⁽¹⁾, 전달경계⁽²⁾, 경계해법⁽³⁾, 경계요소⁽⁴⁾ 그리고 무한요소⁽⁵⁾ 등 다양한 기법을 제시하였고, 이를 바탕으로 전용 전산패키지 SASSI⁽⁶⁾, FLUSH⁽⁷⁾ 그리고 KIESSI⁽⁸⁾ 등을 개발하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진해석기술을 실무분야에 적용하였다.

¹⁾ 정희원·한국원자력연구원 연구로공학부 박사후연구원

(대표저자: seosck@kaeri.re.kr)

²⁾ 한국원자력연구원 연구로공학부 책임연구원

³⁾ 정희원·전남대학교 건설·환경공학부 부교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회에 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 8. 20 / 수정일 1차 : 2008. 10. 8, 2차 : 2008. 10. 30, 3차 : 2008. 11. 20 / 게재확정일 : 2008. 11. 20)

본 연구에서는 3차원 지반-구조물 상호작용계의 지진 해석기법에 대해서 논하며, 이를 위해 3차원 원역의 파동 전달과 모형을 위하여 동적 무한요소를 적용하였다. 무한요소는 SSI 분야 뿐 아니라 다양한 물리적 문제에 폭넓게 적용되고 있다. 유한요소로 모형화하는 근역 밖의 원역의 동적 거동을 효과적으로 나타내기 위하여 고안한 인위적인 경계 조건이며 정식화 과정도 유한요소와 유사하고 쌍방 결합하기 용이한 장점을 가지고 있다. 동적 무한요소에 대한 개발과 적용사례들은 80년대 초반 이래 많은 연구자들에 의한 다양한 모형화 기법의 제안이나, 해의 정확성을 향상하기 위하여 많은 노력이 있었다.⁽⁹⁻¹⁷⁾

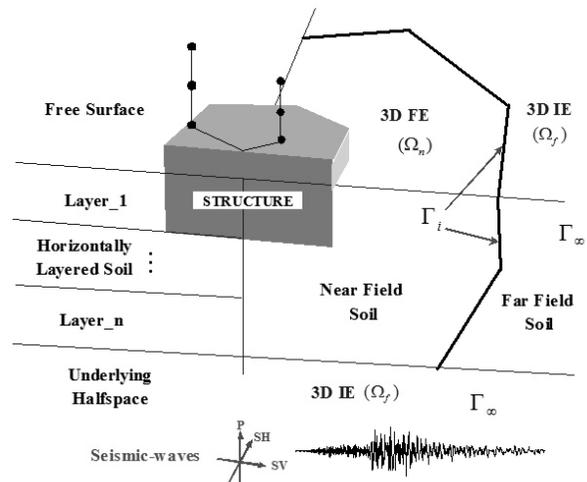
본 연구와 관련하여 3차원 동적 무한요소에 대한 연구와 적용 사례만을 살펴보면, 균질 지반-구조계의 동탄성 문제를 다룬 Zhao and Valliappan⁽¹⁰⁾의 3차원 동적 사상무한요소와 비교적 최근 서춘교⁽¹⁶⁾ 등이 제안한 직육면체 또는 임의 형상의 근역에 결합되는 적층반무한 원역의 동적 무한요소로 국한되어 있다. 그러한 측면에서 3차원 동적 무한요소를 적용한 지반-구조물 상호작용계의 지진응답해석의 연구 사례는 극히 드물다. 그 이유는 3차원 지반-구조물 상호작용계의 수치적 모델이 2차원이나 축대칭에 비하여 비효율적이고, 원역의 점근적 파동해를 근사적 수치해를 사용해야 하는 근원적 한계가 있기 때문이다. 또한 3차원 수치해석 모형화의 작업도 복잡하며 매우 큰 자유도계를 계산하기 위해서는 고성능 연산 시스템이 필연적으로 뒷받침되어야 하기 때문이다. 그래서 과거 연구자나 실무자들은 3차원 지반-구조물 상호작용계를 2차원이나 축대칭 좌표계로 단순화하거나, 지반을 스프링 상수로 치환하여 처리하는 방법을 피하기도 하였다. 그러나 이 방법들은 간편하고 효율적 해석과 보수적 설계 관점에서 접근 가능한 방식이지만 3차원 지반-구조물 상호작용계에 대한 정밀한 해석 절차라 할 수는 없다.

본 연구의 목적은 기 개발한 3차원 동적 무한요소⁽¹⁸⁾를 접목하여 실제의 3차원 지반-구조물 상호작용계를 수치모형화하고, 임의 또는 정형의 근·원역 경계면상의 입사 지진력을 구한 후 지진응답해석을 수행하는 것이다. 지난 연구에서는 전형적 표면기초의 동적 응답을 구하여 3차원 동적 무한요소의 성능 검증은 하였고, 본 논문에서는 무한요소를 적용했을 때 3차원 상호작용계의 등가 지진력을 구하여 지반-구조물 상호작용계의 동적 응답을 고찰하는 것이다. 이 일련의 해석과정은 자체 개발 프로그램인 KIESSI에 의해 수행되며 구해진 값들은 다른 기법이나 전용 패키지에 의해 구한 값들과 비교된다. 그 첫 번째 검증 예제로서 Hualien 층상지반에 대한 다양한 지진입력 성분 P, SV와 SH파를 모두 적용한 자유장의 지반응답해석이다. 두 번째 적용 예제

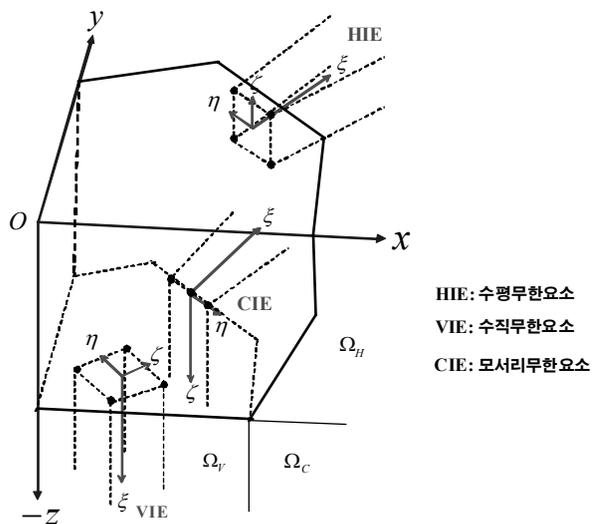
로서는 균질 또는 적층상의 전형적 원자로 구조물에 대해서 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진응답해석을 수행하여 원자로 격납건물 내부의 구조물 상단의 층 응답스펙트럼을 구하는 것이다. 이 예제해석에서 구한 응답을 분석하여, 3차원 동적 무한요소가 지반-구조물 상호작용계의 지진응답을 잘 구현하는지를 논하기로 한다.

2. 수치적 모형화 및 운동방정식

수직 입사 지진하중이 가해지는 3차원 지반-구조물 상호작용계를 그림 1과 같이 구조물과 근역 지반영역(n)과 인위적 경계면(i) 바깥의 영역을 층상 원역지반(f)으로 구분하였다. 또한 구조물과 근역지반은 비적합 3차원 유한요소로서 원역지반은 동적 무한요소를 이용하여 그림 2와 같이 모형화하였다. 이 수치적 모형화는 z -방향 수평층상에 대한 임의의 입체 형상을 가지므로 유·무한 경계의 특징상 3개의



〈그림 1〉 수직입사 지진파를 받는 3차원 지반-구조 상호작용계의 개념도



〈그림 2〉 3차원 무한요소를 이용한 무한영역의 모형화 방법

- HIE: 수평무한요소
- VIE: 수직무한요소
- CIE: 모서리무한요소

무한 영역($\Omega_H, \Omega_V, \Omega_C$)으로 나눌 수 있으며, 각각의 무한 영역은 수평, 수직 그리고 모서리무한요소로 처리하였다. 각 무한요소의 변위장과 파동 형상함수의 특징에 대한 자세한 기술은 본 논문에서는 생략한다.⁽¹⁸⁾

일반적으로 지진하중이 가해 질 때, 지반-구조물 상호작용계의 주파수영역 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{mn}(\omega) & \mathbf{S}_{ni}(\omega) \\ \mathbf{S}_{im}(\omega) & \mathbf{S}_{ii}(\omega) + \bar{\mathbf{S}}_{ii}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_n(\omega) \\ \mathbf{U}_i(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_i^f(\omega) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{U}(\omega)$ 는 이 상호작용계의 절대 변위를 나타내는 복소벡터이다. $\mathbf{p}_i^f(\omega)$ 는 유·무한 경계에서 구해진 등가 지진 하중벡터이다. $\mathbf{S}(\omega)$ 은 유한요소법에 의해 구해진 근역의 동적 강성행렬이고 $\bar{\mathbf{S}}(\omega)$ 은 동적 무한요소를 적용하여 구한 근·원역의 경계 및 원역의 동적 강성행렬 또는 임피던스이다. 이 임피던스 행렬은 무한요소의 요소 행렬에 의해 다음과 같이 조합할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{S}}^{(e)}(\omega) = (1 + j2\beta_d^{(e)})\bar{\mathbf{K}}^{(e)}(\omega) - \omega^2\bar{\mathbf{M}}^{(e)}(\omega) \quad (2)$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$; $\beta_d^{(e)}$ 는 해당 무한요소(e)의 감쇠비이다. $\bar{\mathbf{K}}^{(e)}(\omega)$ 와 $\bar{\mathbf{M}}^{(e)}(\omega)$ 는 각각 무한요소의 강성 및 질량행렬이다.

3. 등가 지진하중 산정과 지진응답

본 연구에서는 두 응답계의 중첩과 힘의 평형을 이용한 외부고정경계법을 적용하였다.⁽¹⁹⁾ 즉 그림 3을 보듯이 등가 지진 하중벡터 \mathbf{p}_i^f 는 자유장해석의 결과와 지반-구조계의 동적 강성을 이용하여 구해지고, 만약 경계면에 작용하는 반력($-\mathbf{p}_i^f$)을 구할 수 있다면 지진응답도 쉽게 구할 수 있다. 이 기법은 단위통제운동($\mathbf{X}_c(\omega)=1$)이 가해졌을 때 평행층상의 경계점(f)의 변위 벡터 $\mathbf{U}_i^f(\omega)$ 와 응력벡터 $\mathbf{t}_i^f(\omega)$ 를 자유

장해석으로 구하고, 지진하중을 받는 자유장시스템의 근역을 배제한 경계면에서 변위를 '0'으로 하는 가상적 반력을 구함으로써 지진하중을 산정하는 방법이라 할 수 있다. 따라서 등가지진하중은 아래와 같이 나타낸다.

$$\mathbf{p}_i^f(\omega) = \bar{\mathbf{S}}_{ii}(\omega)\mathbf{U}_i^f(\omega) - \mathbf{A}\mathbf{t}_i^f(\omega) \quad (3)$$

여기서, \mathbf{A} 는 자유장 응력을 절점력으로 변환하기 위한 임의 사각형상 경계의 계수면적으로 나타낸 상수행렬이며, 아래 식과 같이 나타내었다.

$$\mathbf{A} = [A_{ij}] = \left[\sum_{j=1}^4 \sum_{m=1}^{NG} \sum_{n=1}^{NG} N_i(\xi_m, \eta_n) N_j(\xi_m, \eta_n) |J_{mn}| W_m W_n \right] \quad (4)$$

여기서, NG 는 사용한 가우스 적분점의 개수이다. (ξ_m, η_n) 은 적분점이고 w 는 가중치이다. 또한 한 예로서 $|J_{mn}| W_m W_n = \left(\frac{\partial y}{\partial \xi_m} \frac{\partial z}{\partial \eta_n} - \frac{\partial z}{\partial \xi_m} \frac{\partial y}{\partial \eta_n} \right) W_m W_n = n_x A_x$ 는 그림 3에서 보듯이 자유장 응력을 x 축 방향력으로 변환할 수 있게 경계면의 수직 투영된 면적이다. 입사지진의 방향성분에 따라 근·원역의 경계면에서 응력 벡터 $\mathbf{t}_i^f(\omega)$ 는 달리 정의하며 그림 3에 나타내었다. 최종적으로 변위장은 다음과 같이 입사 지진운동 $\ddot{\mathbf{x}}_c(t)$ 에 대한 지반-구조계의 응답함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{X}}_c(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{\mathbf{x}}(t) e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

$$\mathbf{U}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\ddot{\mathbf{X}}_c(\omega) \quad (6)$$

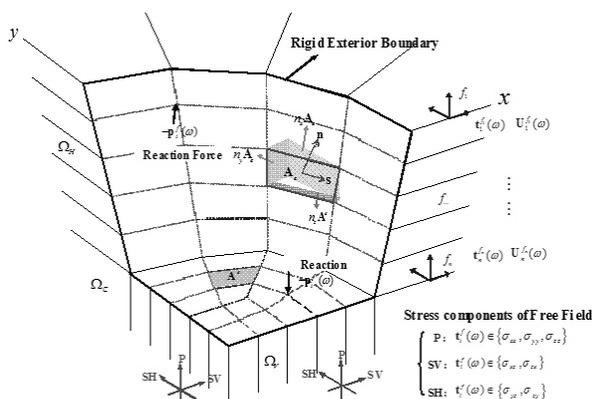
여기서 $\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{S}^{-1}(\omega)$ 로서 주파수응답함수 또는 전달함수이다. 입력 통제운동의 Fourier 변환값 $\ddot{\mathbf{x}}_c$ 은 주파수축에서 대단히 불규칙하므로 정확한 동적 해석을 위해서는 많은 주파수 점에서 응답을 구해야 한다. 따라서 단위 통제운동에 대한 주파수응답함수의 매끈한 특성을 이용하여, 한정된 주파수 응답값을 이용하여 다수의 주파수 점에 대한 응답을 보간하였다.⁽¹⁵⁾ 최종적으로 식 (6)에서 구한 복소응답을 아래와 같은 Inverse Fourier 변환 관계를 이용하여 지반-구조계의 시간이력 변위 및 가속도 응답을 구할 수 있다.

$$\mathbf{u}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{U}(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad \ddot{\mathbf{u}}(t) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 \mathbf{U}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (7)$$

4. 예제 해석

4.1 HUALIEN 지반의 지반응답해석

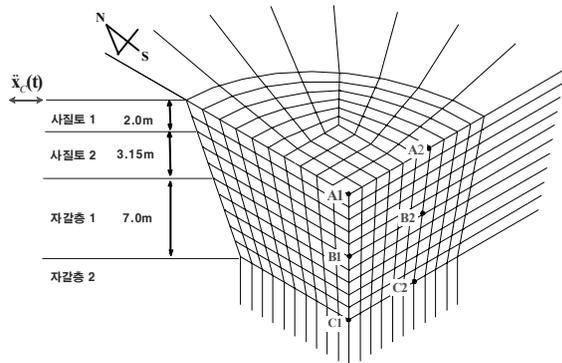
본 예제해석의 목적은 근역과 원역 경계면에 지진력이 효과적으로 입사되는지 여부를 정해와 비교하여 살펴 보는 것이다. 즉 지반-구조물 상호작용 해석기법을 검증할 때, 지진



〈그림 3〉 외부고정경계법에 의한 경계면상의 3차원 지진하중 산정

입력방법과 원역 모형화 방법의 타당성은 자유장해석을 통해 검증된다. 따라서 식 (1)을 적용하여 그림 4와 같이 4개의 수평 층상으로 구성된 반무한 자유장영역을 3차원의 비정형 모델을 통해 지반지진해석을 수행하고, 이를 SHAKE⁽²⁰⁾에 의한 1차원 선형 자유장해석 결과와 비교하였다. 이 자유장 예제는 Hualien 대형 지진시험을 수행한 부지의 자유장지반으로서 지반의 물성치는 표 1과 같다. 입력지진은 그림 6(a), 그림 8(a) 및 그림 10(a)와 같이 해당 지역의 실제 계측된 가속도 기록을 사용하였으며, 수직지진 및 수평지진을 각각 반무한 영역에서 수직으로 입사하는 P파와 S파(SV 및 SH파)로 설정하였다. 본 연구의 수치해석 모델의 지진응답 산정지점은 그림 4에서 보는 바와 같이 6군데 지점으로 하였고 지진입력은 지표면으로 하였다.

그림 5는 각 입력방향에 대한 위치별 주파수 응답함수 ($H(\omega/2\pi)$)를 나타낸다. 통상 수평층상에서 SV파와 SH파는 입사방향의 차이와 관계없이 동일한 주파수 응답을 보이는데, 이를 그림 5(a)와 그림 5(b)에서 확인할 수 있다. 또한 SHAKE 해석의 결과를 주파수 응답함수로 나타내어 같이 도시하여 비교하였다. 고주파 영역에서 약간의 오차가 발생하는데 이는 유한요소 모델의 체는 크기와 관련이 크며 더 조밀하게 모델링을 할 경우 이 문제를 극복할 수 있다. 최종적으로 식



〈그림 4〉 수평 적층 자유장 지반과 수치해석 모형화

〈표 1〉 자유장해석 예제의 지반 물성치

지반 적층	물성치	전단파 속도(m/sec)	단위 질량(Mg/m ³)	감쇠비	포아송비
사질토 1		133	1.69	0.02	0.38
사질토 2		231	1.93	0.02	0.48
자갈층 1		317	2.42	0.02	0.47
자갈층 2(반무한 영역)		476	2.42	0.02	0.47

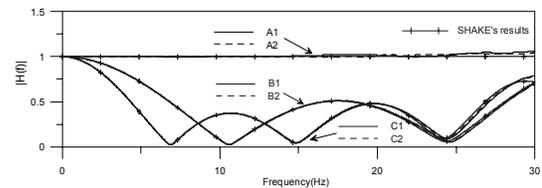
〈표 2〉 자유장해석 문제의 본 연구에 의한 전달함수와 정해 전달함수 사이의 상대오차율 비교

지표면 입사 지진	각 지점의 오차율 (%)					
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
A15NS (SV)	0.17	0.17	0.25	0.26	0.73	0.73
A15EW (SH)	0.20	0.21	0.45	0.45	0.85	0.85
A15UD (P)	0.18	0.18	0.29	0.30	0.80	0.81

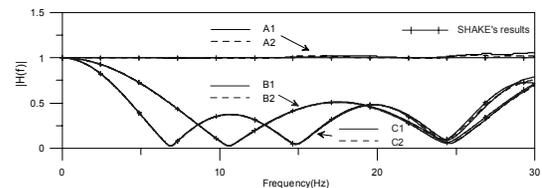
(6)과 식 (7)을 이용하여 지표면과 GL-12.15m 지층의 지진 입력방향에 따른 시간이력 응답을 그림 6~그림11에 나타내었다. 이 응답의 정확성을 알아보기 위하여 본 연구에서 구한 시간이력 함수 $\ddot{u}(t)$ 는 지표면 통제운동($\ddot{x}(t)$)이나 SHAKE 해석결과($\ddot{u}_{SH}(t)$)와의 상대오차율($\|e\| = \|\ddot{u}_{SH}(t) - \ddot{u}(t)\| / \|\ddot{u}_{SH}(t)\| \times 100$)을 구하였고, 이를 표 2에 정리하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 본 연구에 의한 해석결과는 매우 낮은 오차율을 보였다. 이는 기 개발한 3차원 무한요소의 성능이 우수하며 이를 활용한 지진해석 방법이 효율적임을 입증한다.

4.2 지반-구조물 상호작용을 고려한 원자로 격납건물의 층응답스펙트럼 작성

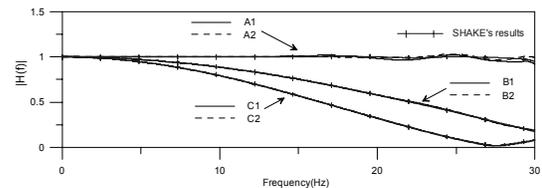
두 번째 예제는 전형적 원자로 격납건물의 층응답스펙트



(a) SV 파

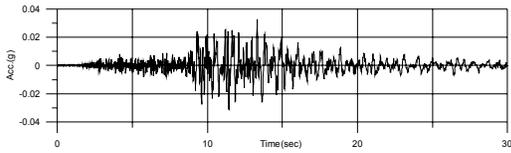


(b) SH 파

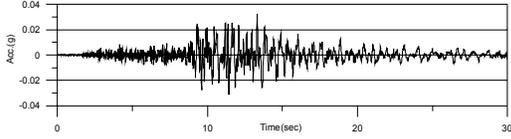


(c) P파

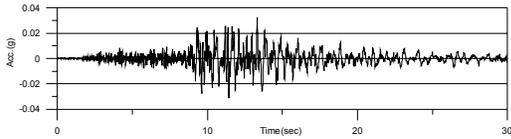
〈그림 5〉 각각의 입력방향에 대한 위치별 주파수 응답함수



(a) 지표면에 입사한 SV 파(A15NS: 남북 방향)

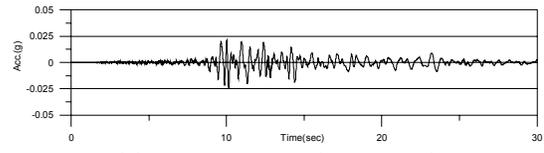


(b) 지진응답해석(A1)

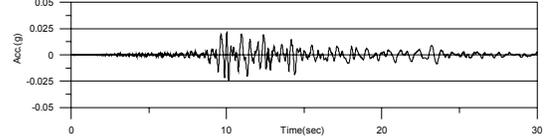


(c) 지진응답해석(A2)

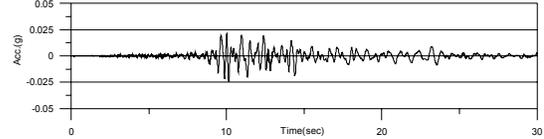
〈그림 6〉 SV 파 입력지진에 대한 자유장 해석과 지반지진응답 해석결과와의 비교(지표면)



(a) SHAKE 해석 결과(GL-12.15m)

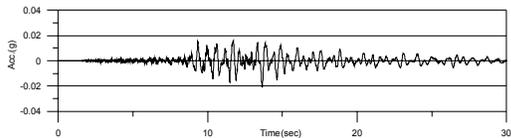


(b) 지진응답해석(C1)

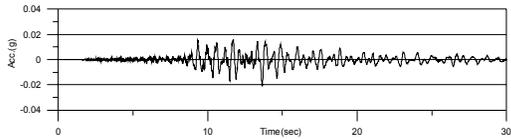


(c) 지진응답해석(C2)

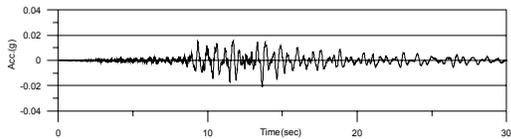
〈그림 9〉 SH 파 입력지진에 대한 자유장 해석과 지반지진응답 해석결과와의 비교(GL-12.15m)



(a) SHAKE 해석 결과(GL-12.15m)

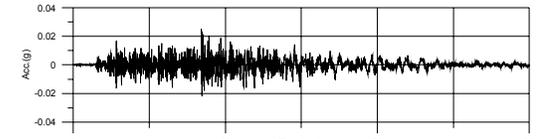


(b) 지진응답해석(C1)

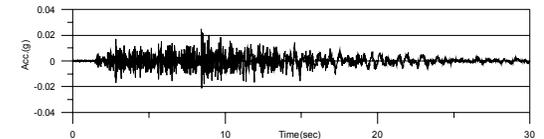


(c) 지진응답해석(C2)

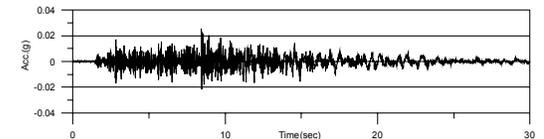
〈그림 7〉 SV 파 입력지진에 대한 자유장 해석과 지반지진응답 해석결과와의 비교(GL-12.15m)



(a) 지표면에 입사한 P 파(A15UD: 수직방향)

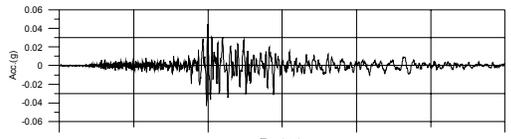


(b) 지진응답해석(A1)

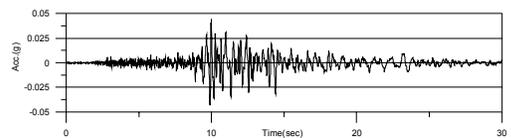


(c) 지진응답해석(A2)

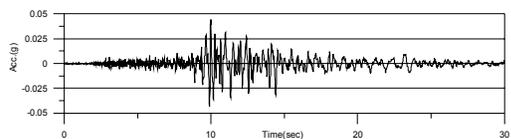
〈그림 10〉 P 파 입력지진에 대한 자유장 해석과 지반지진응답 해석결과와의 비교(지표면)



(a) 지표면에 입사한 SH 파(A15EW: 동서방향)

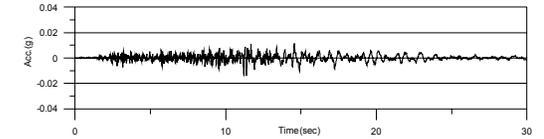


(b) 지진응답해석(A1)

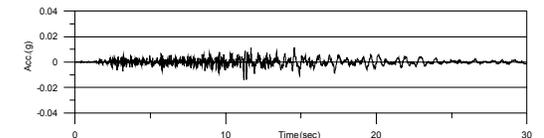


(c) 지진응답해석(A2)

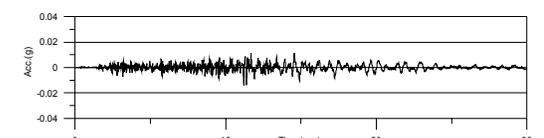
〈그림 8〉 SH 파 입력지진에 대한 자유장 해석과 지반지진응답 해석결과와의 비교(지표면)



(a) SHAKE 해석 결과(GL-12.15m)



(b) 지진응답해석(C1)



(c) 지진응답해석(C2)

〈그림 11〉 P 파 입력지진에 대한 자유장 해석과 지반지진응답 해석결과와의 비교(GL-12.15m)

럼을 작성하는 것이다. 층응답 스펙트럼은 설계지진에 의한 각 층의 동적 거동특성을 나타내기도 하고, 동시에 신규 설치할 구조물 내부 설비 장치의 지진해석에서 사용할 설계 응답스펙트럼으로도 활용된다. 이 예제는 그림 12(a)와 같이 SASSI 사용자 매뉴얼에 수록되어 있는 것으로 본 논문의 해석 예제로 동일하게 적용되었다.⁽⁶⁾ 상부 구조물은 18개의 보 요소와 집중질량으로 하였고 Stick 모델의 단면상수들과 원역 지반의 물성치는 표 3과 표 4에 나타내었다. SASSI와 KIESSI 해석을 위한 유한요소 모델은 그림 12(b)와 그림 12(c)와 같고, 격납건물과 내부구조물의 Stick 모델은 근역의 기초와 지반의 3차원 입체요소에 직접 결합하는 방식을 취하였다. KIESSI 해석 모델은 기본적으로 그림 4의 모형화 개념과 같으며, 원역 지반의 동적 무한요소는 원형 기초판 반지름의 2배의 거리에 결합되었다. 입력지진은 SV파형의 통제운동으로 하였고 그림 13(a)와 같이 El Centro 지진 남북방향 성분의 최대가속도를 0.1g로 조정하여 0.005초 간격으로 앞부분의 8.8초 만을 발췌한 가속도 시간이력을 적용하였다. 또한 그림 13(b)에 감쇠비 2%와 5%에 해당되는 지반 응답스펙트럼을 동시에 나타내었다.

먼저 지반-구조물 상호작용을 고려했을 때, 상호작용계의

동특성은 무질량 강판의 산란장 응답으로부터 알 수 있다. 즉 하부 구조물이 지표면에 접하는 면에 대해서 별도의 무질량 강체 기초판을 설치하여 컴플라이언스 또는 임피던스 해석을 수행하여야 한다. 본 연구의 해석값은 KIESSI에 의해 수행되고 Luco와 SASSI의 계산 결과와 비교되었다. 그림 14는 본 원자로 격납건물의 원형기초판의 수평 및 락킹 임피던스 함수의 실수부를 나타내며, 보이는 해석치들은 서로 비슷함을 알 수 있다.

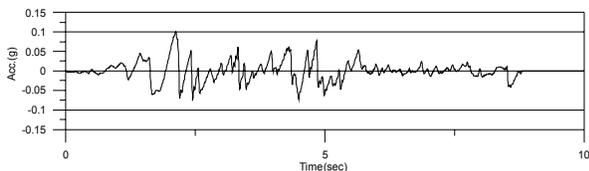
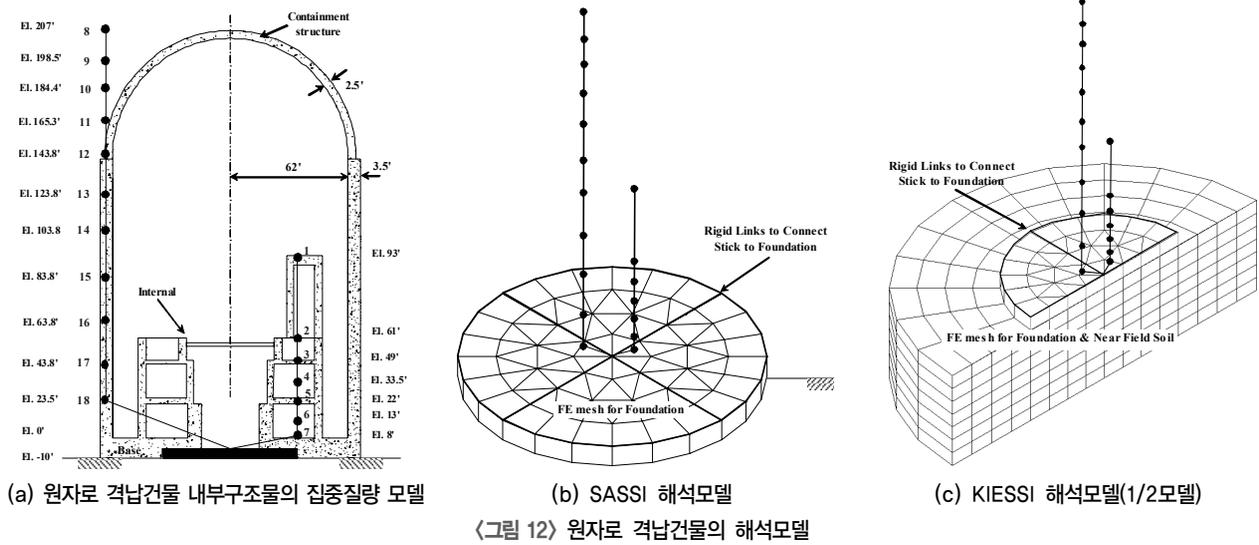
그림 15(a)은 식 (7)에 의해서 원자로 내부 구조물 상단(절점 1)의 가속도 시간 이력도를 나타낸다. 입력지진에 대해서 절점1의 시계열 응답은 최대 가속도가 2.1배 증폭되어 있음을 알 수 있다. 그림 15(b)는 감쇠비 2%에 해당되는 격납건물 내부구조물 상단의 층응답스펙트럼을 나타낸다. 이 결과는 SASSI 해석 및 Bechtel사의 지진해석 프로그램 FASS⁽²¹⁾의 결과와 비교하였다. 서로 근접한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있고, 부분적으로 차이가 나는 것은 원역의 임피던스 함수의 차이와 입력지진을 절점 하중으로 변환하는 방법이 다른 점에서 기인한 차라고 판단된다. 따라서 이 예제를 통해서 얻을 수 있는 결론은 본 연구의 방법이 지반-구조물 상호작용계의 주파수 응답특성을 잘 구현하고 있음

〈표 3〉 원자로 격납건물의 제원

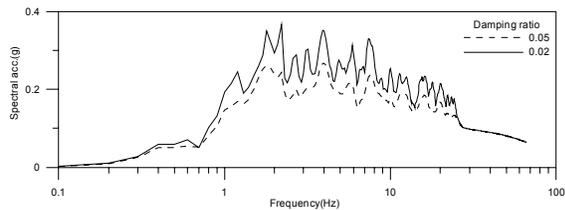
절점 번호	중량 (ton)	절점간 위치	단면적 (m ²)	전단면적 (m ²)	단면2차모멘트 (m ⁴)
내부구조물					
1	372.0	2 to 1	16.7	6.5	34.5
2	553.4	3 to 2	72.5	33.4	1726.2
3	3873.7	4 to 3	161.7	55.7	7767.9
4	1705.5	5 to 4	182.1	67.8	11220.3
5	2853.1	6 to 5	205.3	135.6	10357.2
6	1138.5	7 to 6	237.8	144.9	10357.2
7	1260.1	base to 7	185.8	122.6	9494.1
격납건물					
8	86.2	9 to 8	92.0	46.5	1726.2
9	961.6	10 to 9	92.0	46.5	6904.8
10	1120.4	11 to 10	92.0	46.5	12946.5
11	1369.9	12 to 11	92.0	46.5	16398.9
12	2091.1	13 to 12	130.1	65.0	24166.7
13	1905.1	14 to 13	130.1	65.0	24166.7
14	1905.1	15 to 14	130.1	65.0	24166.7
15	1905.1	16 to 15	130.1	65.0	24166.7
16	1905.1	17 to 16	130.1	65.0	24166.7
17	1905.1	18 to 17	130.1	65.0	24166.7
18	2086.6	Base to 18	130.1	65.0	24166.7

〈표 4〉 원자로 구조물 하부의 지반 상수

	전단파 속도(m/sec)	단위 질량 (ton/m ³)	감쇠비	프라이슨비	층 깊이(m)
균질지반	609.6	2.08	0.05	1/3	-
적층 지반	304.8	1.76	0.05	1/3	19.8
	609.6	2.08	0.05	1/3	-

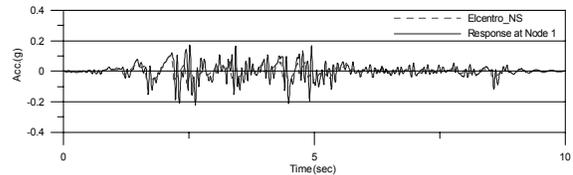


(a) El Centro NS 지진(0 ~ 8.8 sec)

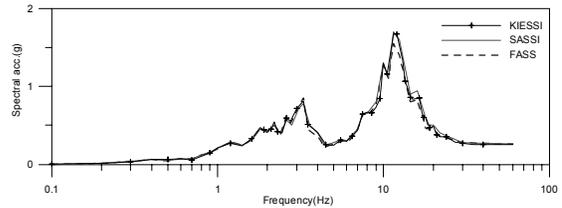


(b) 지반 응답스펙트라

〈그림 13〉 El Centro 지진파와 지반 응답스펙트라

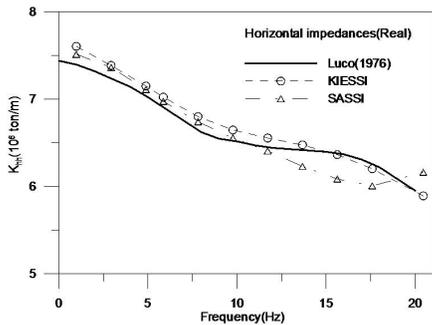


(a) 시계열 가속도응답

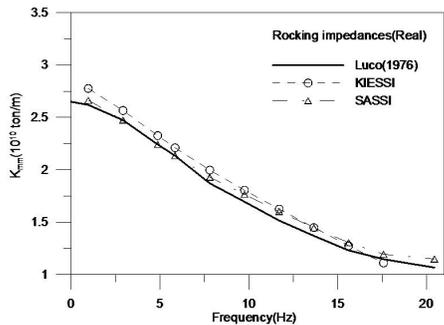


(b) 응답 스펙트라

〈그림 15〉 균질지반상의 원자로 내부구조 상단의 층응답 스펙트라(감쇠비 = 2%)

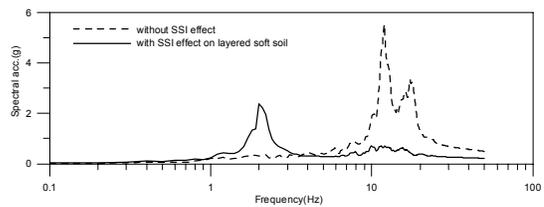


(a) Horizontal impedance



(b) Rocking impedance

〈그림 14〉 무질량 원형기초의 임피던스 함수 (실수부)



〈그림 16〉 적층 지반상의 원자로 내부구조 상단의 층응답 스펙트럼과 SSI를 고려하지 않은 경우와 비교(감쇠비 = 2%)

을 알 수 있다.

마지막 응용 예제로서 표 4에 나타냈듯이, 전단파 속도를 절반으로 줄인 19.8m 두께의 연약층을 이루는 적층 지반에 본 원자로 격납건물 내부구조물의 지진 응답 특성을 알아보았다. 이 비교 연구의 목적은 격납건물 하단기초를 고정 지점으로 하여 상호작용을 고려하지 않은 순수 유한요소 해석했을 때와 어떻게 다른 스펙트럼 양상이 나타나는지 살펴보는 것이다. 이 예제 해석도 상기의 예제와 동일한 지진파로 하는 하부 암반 입력조건으로 하였다. 다만 SSI 효과를 고려

하지 않은 경우는 지반과의 접하는 절점을 고정조건으로 하였으므로 지반의 모형화나 무한요소의 사용은 없다. KIESSI 프로그램에는 유한요소의 주파수 영역 지진해석도 가능하며, 아래와 같은 수식으로 구조물의 절대 가속도 시계열을 산출할 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\ddot{\mathbf{u}}^R(\omega) + \ddot{\mathbf{X}}_c(\omega)) e^{j\omega t} d\omega = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (1 - \omega^2 \ddot{\mathbf{H}}(\omega)) \ddot{\mathbf{X}}_c(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (8)$$

여기서, 절대가속도는 통제운동 $\ddot{\mathbf{X}}_c(\omega)$ 과 상대가속도 $\ddot{\mathbf{u}}^R(\omega) = -\omega^2 \ddot{\mathbf{H}}(\omega) \ddot{\mathbf{X}}_c(\omega)$ 의 합으로 나타낼 수 있고, 주파수 응답함수 $\ddot{\mathbf{H}}(\omega) = -\mathbf{M}((1 + j2\beta_d)\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})^{-1}$ 로서 주파수 독립 요소행렬로 정의할 수 있다. 그림 16에는 SSI 효과가 고려된 경우와 그렇지 않은 경우의 격납건물 내부구조물 상단의 층응답스펙트럼을 동시에 나타내었다. 이 스펙트럼의 최대치는 줄었으나, 주파수 특성이 크게 달라졌으며 2Hz 부근에서 응답증폭이 두드러짐을 알 수가 있다. 이 현상의 원인은 지진파가 연약지층을 통과할 때 지반 고유의 저주파 성분의 증폭현상과 관련이 깊은 것으로 판단된다. 따라서 연약지반상의 구조물 해석은 하부 고정지점으로 하는 유한요소 해석으로는 정확한 동적 해석이 될 수 없으며 지반-구조물 상호작용의 고려가 반드시 필요하다는 점을 재확인할 수 있다. 하부 고정지점의 유한요소 해석은 보수적 관점에서 더 큰 응답스펙트럼 값을 주지만, 구조물 주변 지반 조건의 동특성을 전혀 고려하지 못한 결과라고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 3차원 유한 및 동적 무한요소를 이용한 지반-구조물 상호작용계의 지진 응답에 대한 고찰이 있었다. 즉 3차원 원역을 동적 무한요소로 모형화하고 근원역의 경계에서 등가 지진력을 구한 후, 최종적으로 근역 구조계의 응답을 구하는 것이다. 이를 위한 등가지진력의 산정은 주파수 영역에서 원역 지반의 임피던스 함수와 수직 입사 지진파에 대한 자유장 운동의 응답을 구한 후, 외부고정경계법에 의해 계산되었다. 본 연구와 관련한 제안된 이론과 일련의 해석 과정은 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 전용 프로그램 KIESSI에 장착되었다.

검증 예제로서 구조물이 없는 Hualien 자유장지반의 지반응답해석이 수행되었다. 다양한 지진입력 성분 P, SV와 SH파를 모두 적용하여 지반내부 관심지점의 응답을 구한 후, SHAKE 해석의 결과와 비교 분석하였다. 구한 시계열

응답은 참조 결과와 비교하여 매우 낮은 오차율을 기록하였고, 이는 기 개발한 3차원 동적 무한요소의 성능이 우수하며 이를 활용한 지진해석 방법이 유효함을 입증할 수 있었다.

응용 예제로서는 전형적 원자로 격납건물의 지반-구조물 상호작용을 고려한 층 응답스펙트럼을 작성하였다. 원자로 내부구조물 상단의 가속도응답을 구하고 이를 SASSI의 해석 결과와 비교하여 서로 근접한 경향을 나타남을 알 수 있었다. 또한 하부지반을 연약한 지층을 포함하는 적층으로 하였을 때, 층 응답스펙트럼의 특성은 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우와 비교하여 주파수 특성이 크게 달라지고 저주파 대역에서 증폭효과가 나타남을 알 수가 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구원/원자력기초과학연구본부/연구공학부의 ‘연구로계통공학 기술연구’ 과제(524140-08)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- White, W., Valliappan, S., and Lee, I.K., "Unified boundary for finite dynamic model," *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE*, Vol. 103, 1969, pp. 160-174.
- Tassoulas, J.L., "Elements for the numerical analysis of wave motion in layered media," *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol. 19, 1983, pp 1005-1032.
- Luco, J.E., "Impedance functions for a rigid foundation on a layered medium," *Nuclear Engineering & Design*, Vol. 31, 1974, pp. 204-217.
- Chen, C.H., Penzien, J., "Dynamic modeling of axisymmetric foundation," *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, Vol. 14, 1986, pp. 823-840.
- Medina, F., Penzien, J., "Infinite elements for elasto-dynamics," *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, Vol. 10, 1982, pp. 699-709.
- Lysmer, J., Tabatabaie-Raissi, M., Tajirian, F., Vahdani, S., and Ostadan, F., *SASSI: A System for Analysis of Soil-Structure Interaction*, User's Manual, University of California, Berkeley, 1988.
- Lysmer, J., Takekazu, U., Chen-Feng, T., and Seed, H.B., *FLUSH - A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems*, Rep. No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, California, 1975.
- Yun, C.B., Yang, S.C., Kim, J.M., Kim, D.K., Choi, J.S., Chang, S.H., and Seo, C.G., *User's manual of KIESSI program for 2D, AXI and 3D fluid-soil-structure interaction system*, Dynamic structural Lab., KAIST, 2007.

9. Rajapakse, R.K.N.D. and Karasudhi P., "An efficient elastodynamic infinite element," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 22, 1986, pp. 643-657.
10. Zhao, C. and Valliappan, S., "A dynamic infinite element for three-dimensional infinite-domain wave problems," *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol. 36, 1993, pp. 2567-2580.
11. Yang, Y.B., Kuo, S.R. and Hung, H.H., "Frequency-independent infinite elements for analyzing semi-infinite problems," *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol. 39, 1996, pp. 3553-3569.
12. Yang, S.C., Yun, C.B., "Axisymmetric infinite elements for soil-structure interaction analysis," *Engineering Structures*, Vol. 14, 1992, pp. 361-370.
13. Yun, C.B., Kim, J.M., Hyun, C.H., "Axisymmetric elastodynamic infinite elements for multi-layered half-space," *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol. 38, 1995, pp. 3723-3743.
14. Yun, C.B., Kim, D.K., Kim, J.M., "Analytical frequency-dependent infinite elements for soil-structure interaction analysis in two-dimensional medium," *Engineering Structures*, Vol. 22, 2000, pp. 258-271.
15. Choi, J.S., Yun, C.B., Kim, J.M., "Earthquake response analysis of the Hualien soil-structure interaction system on based updated soil properties using forced vibration test data," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, 2001, pp. 1-26.
16. Seo, C.G., Yun, C.B., Kim, J.M., "Three-dimensional frequency dependent infinite elements for soil-structure-interaction," *Engineering Structures*, Vol. 29, 2007, pp. 3106-3120.
17. Yun, C.B., Chang, S.H., Seo, C.G., Kim, J.M., "Dynamic infinite elements for soil-structure interaction analysis in a layered soil medium," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 7, 2007, pp. 693-713.
18. 서춘교, 윤정방, 김재민, "방사형 3차원 동탄성 무한요소," 대한토목학회 논문집, Vol. 27, 2007, pp. 701-711.
19. Zhao, C. and Valliappan, S., "An efficient wave input procedure for infinite media," *Communications in Numerical Methods in Eng.*, Vol. 9, 1993, pp. 407-415.
20. Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., *SHAKE91 -- A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*, Earthquake Engineering Research Center, UCB, USA, 1991.
21. Bechtel Power Corporation, *Computer program CE933 (FASS): Fourier Analysis of Soil-Structure System*, San Francisco, California, CA.