

# 지반-구조물의 상호작용 해석을 위한 무한요소

## Infinite Elements for Soil-Structure Interaction Analysis

양	신	추*
Yang,	Sin	Chu
윤	정	방**
Yun,	Chung	Bang
이	인	모***
Lee,	In	Mo

### 요 약

본 논문에서는 Rayleigh파, 전단파 및 압축파의 영향을 동시에 해석할 수 있는 주파수 종속 무한요소와 이를 이용한 지반-구조물의 동적상호작용의 해석법에 대하여 연구하였다. 방사적으로 전파되는 응력파의 성분에 대한 무한요소와 아울러 매립(Embedded)기초나 적층(Layered)지반을 해석하기 위하여 수평으로 전파되는 파를 해석할 수 있는 무한요소를 개발하였고 요소행렬 구성하기 위한 적분식, 하나의 파성분만 존재하는 경우에 대하여 효율적으로 적용되었던 Newton Cotes 적분과 유사한 방법을 Multi-Waves 문제에 알맞게 확장 적용하였다. 이 방법의 타당성은 반무한, 균질 지반에 위에 놓여 있는 원형강판과 지반에 묻혀 있는 원통형 강체기초의 Compliance 함수를 구하여 기존의 문헌에 발표된 값과 비교 함으로써 검증하였다. 예제해석은 지진하중을 받는 원자력발전소 격납구조를 대상으로 하여 수행하였으며, 매립깊이의 크기, 지반의 재료감쇠 및 지반의 모형기법에 따른 구조물-지반의 상호작용의 해석결과를 비교 분석하였다.

### Abstract

This paper presents a study of soil-structure interaction problems using infinite elements. The infinite elements are formulated for homogeneous and layered soil media, based on approximate expressions for three components of propagating waves, namely the Rayleigh, compressive and shear waves. The integration scheme which was proposed for problems with single wave component by Zienkiewicz is expanded to the multi-waves problem. Verifications are carried out on rigid circular footings which are placed on and embedded in elastic half space. Numerical analysis is performed for a containment structure of a nuclear power plant subjected to a horizontal seismic excitation.

### 1. 서론

많은 공학문제에서 해석하고자 하는 문제의

영역이 반무한 지반과 같이 무한히 멀리 확장되어 있는 경우를 발견하게 된다. 유한요소법으로 이러한 문제를 해석할때, 정적해석의 경우는 충분히 큰 영역을 모형하고 경계면의 조건을 고정으로

\* 정회원, 한국과학기술원 박사과정  
 \*\* 정회원, 한국과학기술원 교수  
 \*\*\* 고려대학교 조교수

□ 이 논문에 대한 토론을 1989년 12월 31일까지 본학회에 보내주시면 1990년 6월 3에 그 결과를 게재하겠습니다.

단순히 처리하여도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있지만, 동적해석의 경우에는 위와 같이 단순 절단된 경계를 사용하면 내부영역으로 향하는 반사파를 유발하므로 실제 결과와는 다른 잘못된 결과를 얻게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 내부영역과 외부영역 사이의 경계면에서 파를 통과시킬 수 있는 전달경계(Transmitting Boundary) 방법<sup>1, 2, 3, 4)</sup>이 제시되어 왔다. 이와 같은 방법들로는 점성(Viscous)경계<sup>1)</sup>, 일치(Consistent)경계<sup>2)</sup>, 중첩(Superposition)경계<sup>3)</sup>, 복합(Hybrid)모형<sup>4)</sup>을 사용하는 방법 등이 있는데 이러한 방법들은 경계에 적용된 가정에 의하여 실제 적용에 있어 지반조건에 따라 제한이 따를 수 있고 경계면이 해석관심영역보다 상당히 멀리 떨어져야 하므로 많은 자유도가 요구되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해석하기 위한 최근의 또 다른 유용한 방법들로서 경계요소법<sup>5, 6)</sup>과 무한요소(Infinite Element)법<sup>7, 8, 9, 10, 11, 12)</sup>이 연구되어지고 있는데 경계요소법은 무한영역에서의 경계조건

(변위=0)에 의하여 결정된 기본해(Fundamental Solution)을 이용하므로 무한영역문제를 해석하는데 있어 효율적이며 기하학적으로 불규칙한 모양을 가진지반의 해석에 용이한 장점을 가지고 있는 반면에 비선형문제를 해석하기는 어려운 단점이 있다. 무한요소법은 내부영역을 유한요소로 모형화하고 외부영역을 최근에 개발된 무한요소를 사용하여 모형화 하는 방법이다. 무한요소는 통상의 유한요소의 기본개념은 유지하여 강성행렬이 유도되고, 또한 인접한 유한요소와 쉽게 병행하여 사용이 가능하므로, 일종의 유한요소처럼 취급할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 Rayleigh파, 전단파 및 압축파의 영향을 동시에 해석할 수 있는 주파수중속 무한요소와 이를 이용한 지반구조물의 동적상호작용의 해석법에 관하여 연구하였다. 이 방법에서는 Medina 가 동탄성 문제를 해석하기 위하여 제안한 형상함수<sup>13)</sup>를 기초로 하되, Medina는 존재하지 않는 압축파의 원주방향 성분 대신에 Rayleigh

표 1. 탄성응력파의 성분 : 균질 및 적층 반무한 반무한지반

성분	지반	Rayleigh파	전단파	압축파
반경성분 ( $f_u$ )	균질	$\left( e^{-pz} - \frac{2ps}{k_R^2 + s^2} e^{-sz} \right) e^{-(1+i)k_R r}$	$\frac{z}{R} e^{-(1+ik_R R_0)\xi}$	$\frac{r}{R} e^{-(1+ik_R R_0)\xi}$
	적층		$\frac{z}{r} e^{-(1+ik_R r_0)\xi}$	$e^{-(1+ik_R r_0)\xi}$
원주성분 ( $f_v$ )	균질	$\left( e^{-pz} - \frac{2ps}{k_R^2 + s^2} e^{-sz} \right) \frac{e^{-(1+i)k_R r}}{k_R r}$	$e^{-(1+ik_R R_0)\xi}$	$\left( e^{-pz} - \frac{2ps}{k_R^2 + s^2} e^{-sz} \right) \frac{e^{-(2+i)k_R r}}{k_R r}$
	적층		$e^{-(1+ik_R r_0)\xi}$	
수직성분 ( $f_w$ )	균질	$\left( e^{-pz} - \frac{2K_R^2}{k_R^2 + s^2} e^{-sz} \right) e^{1+i k_R r}$	$\frac{r}{R} e^{-(1+ik_R R_0)\xi}$	$\frac{z}{R} e^{-(1+ik_R R_0)\xi}$
	적층		$e^{-(1+ik_R r_0)\xi}$	$\frac{z}{r} e^{-(1+ik_R r_0)\xi}$

Parameter definitions :

$r, z$ =cylindrical coordinates ( $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ), for rectangular coordinates  $x, y, z$   
 $R = \sqrt{r^2 + z^2}$ , radial coordinate.  
 $r_0, z_0$ =the radial coordinates of the first node  
 $R_0 = \sqrt{r_0^2 + z_0^2}$ , distance from origion to the first node

$\xi$ =element parametric coordinate in the infinite direction.  
 $k_Q$ =wave propagation number ( $Q=R$ : rayleigh ;  $s$ : shear ;  $p$ : compressional)  
 $s, p = \sqrt{(k_R^2 - K_{s,p}^2)}$

파의 원주방향 성분에 대한 1차 근사식(First Order Approximation)으로 구한 항을 2개로 나누어 3절점 무한요소 구성을 위하여 추가적으로 필요한 파의 성분으로 사용한 것과 달리 본 논문에서는 Rayleigh파의 2차 근사항을 구하여 이를 사용하였다. 또한 매립(Embedded) 기초나 적층(Layered) 지반을 해석하기 위하여, 방사적으로 전파되는 응력파의 성분에 대한 무한요소와 아울러 수평으로 전파되는 파를 해석할 수 있는 무한요소를 개발하였다. 형상함수가 여러 파의 조합으로 구성된 경우, 요소행렬을 구하기 위한 적분시 무한방향에 대하여 통상 사용되는 Gauss-Laguerre 적분방법을 적용하면 조화적으로 감소하는 피적분 함수를 다항식으로 근사시켜 적분하므로 주파수가 증가할 수록 그에 비례하여 많은 적분점을 필요로 한다. 따라서 여기서는 하나의 파만 존재하는 경우에 대하여 효율적으로 적용되었던 Newton Cotes 적분방법과 유사한 방법을 Multi-Waves 문제에 맞게 확장하여 적용하였다.

이 방법의 타당성은 반무한, 균질 지반 위에 놓여 있는 원형강판과 지반에 묻혀 있는 원통형 강체기초의 Compliance 함수들을 구하여 기존의 문헌에 발표된 값들과 비교 함으로써 검증하였다. 예제해석은 지진하중을 받는 원자력발전소 격납구조를 대상으로 하여 수행하였으며, 구조물의 매립깊이, 지반의 재료감쇠 및 지반의 모형기법에 따른 구조물-지반의 상호작용의 해석결과를 비교 분석하였다.

## 2. 동적무한요소-축대칭요소

### 2-1. 형상함수의 구성

반무한 탄성지반을 따라 전파되는 응력파에는 여러종류가 있는데, 여기서는 무한요소내에서의 동적변형을 정의하기 위하여 주요 성분인 Rayleigh 파, 전단파, 압축파등의 3성분만을 고려하였다. 이들 응력파가 외부로 전파될때 균질의 반무한지반(Half Space)과 적층된 반무한지반(Layered half space)에서의 반경, 연직, 회전 방향의 변위성분은 원통좌표계를 사용할때 표1과 같이 근사적으로 나타내어질 수 있다. 이중 압축파의

원주방향성분은 원래는 존재하지 않으나, 그림1과 같이 축대칭 무한요소의 절점을 지반 내부영역 파의 경계면에 있는 3점으로 정의할 경우, 식(1)에서와 같이 각 변위 성분에 대하여 3개씩, 도합 9개의 독립된 파의 성분이 필요하게 되므로, 여기서는 Rayleigh파의 원주방향성분중에 2차(Second Order) 근사항을 사용하였다. Medina 는 표1에서 보인 Rayleigh파의 원주방향성분의 일차 근사식으로 구한 항을 두개로 나누어 추가적으로 필요한 파의 성분을 얻었으나, 본 연구에서는 1차 근사항은 그대로 두고 2차 근사항을 구하여 이 문제를 해결하였다.

무한요소내의 변위를 표1의 3가지 파 성분의 선형조합으로 나타낼때, 반경, 원주 및 연직방향에 대하여 변위형상함수는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \langle N^u(r, z) \rangle &= \langle f_u^r(r, z), f_u^s(r, z), f_u^p(r, z) \rangle [F_u]^{-1} \\ \langle N^v(r, z) \rangle &= \langle f_v^r(r, z), f_v^s(r, z), f_v^p(r, z) \rangle [F_v]^{-1} \\ \langle N^w(r, z) \rangle &= \langle f_w^r(r, z), f_w^s(r, z), f_w^p(r, z) \rangle [F_w]^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$[F_u] = \begin{pmatrix} f_u^r(r_1, z_1) & f_u^s(r_1, z_1) & f_u^p(r_1, z_1) \\ f_u^r(r_2, z_2) & f_u^s(r_2, z_2) & f_u^p(r_2, z_2) \\ f_u^r(r_3, z_3) & f_u^s(r_3, z_3) & f_u^p(r_3, z_3) \end{pmatrix} \quad (2)$$

그리고  $[F_v]$ 와  $[F_w]$ 는 식(2)와 유사한 형태이다.

식(1)과 (2)에서  $f_u^r, f_u^s, f_u^p$ 는 각각 Rayleigh 파, 전단파, 압축파의 반경방향의 응력파성분이며,  $f_v^r, f_v^s, f_v^p$ 는 수직방향성분이다.

전체좌표  $(r, z)$ 로 부터 무한요소의 국부좌표  $(\xi, \eta)$ 로 사영(Mapping)하는 좌표변환은 수평 무한요소 대하여는 아래와 같이 정의 하였고,

$$r = \sum_{k=1}^3 (1 + \xi) L_k^3(\eta) r_k, \quad z = \sum_{k=1}^3 L_k^3(\eta) z_k \quad (3)$$

방사무한요소에 대해서는 다음과 같이 정의하였다.

$$r = \sum_{k=1}^3 (1 + \xi) L_k^3(\eta) r_k, \quad z = \sum_{k=1}^3 (1 + \xi) L_k^3(\eta) z_k \quad (4)$$

여기서  $L_k^3(\eta)$ 는 절점이 3인 Lagrange 형상함수이며,  $0 \leq \xi < \infty$ ,  $-1 \leq \eta \leq 1$ 이다.

식(3)과(4)로 정의되는 대개개변수를 사용하면, 동적무한요소의 강성행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$[K]_j = \int_0^\infty \int_{-1}^1 \int_0^1 [B]_j^T [D] [B]_j J r d\xi d\eta d\theta \quad (5)$$

여기서  $[B]_j$ 는 축대칭요소의 변형률과 절점변위의 관계행렬이며,  $[D]$ 는 3차원 입체요소의 응력과 변형률과의 관계행렬이며,  $|J|$ 는 자코비안 행렬식이다. 또한  $j$ 는  $\theta$ 의  $j$ 번째 조화진동의 미하며, 여기서는 수직거동에 대하여는  $j=0$ , 수평 및 회전방향거동에 대하여서는  $j=1$ 로 취하였다. 마찬가지로 질량행렬은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$[M]_j = \int_0^\infty \int_{-1}^1 \int_0^1 \rho [N]_j^T [N]_j |J| r d\xi d\eta d\theta \quad (6)$$

여기서  $[N]_j = [N_1, N_2, N_3]$

$$N_i = \begin{bmatrix} N_i^u \cos j\theta & 0 & 0 \\ 0 & N_i^v \sin j\theta & 0 \\ 0 & 0 & N_i^w \cos j\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

또한  $\rho$ 는 요소의 밀도이다.

### 2-3. 무한요소의 적분

본 논문의 무한요소와 같이 요소행렬 형성시 피적분함수가 여러과의 곱으로 나타내어지는 경우, 무한변수( $\xi$ )에 대한 적분은 피적분함수에 조화함수의 항이 존재하므로, 통상의 Gauss Laguerre (G-L) 적분방법<sup>13)</sup>으로 적분할 경우 고주파로 갈 수록 많은 적분점이 요구된다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위하여 하나의 파만 있을 경우 효율성이 입증되었던 Modified Newton-Cotes(N-C) 적분방법<sup>14)</sup>을 본 연구와 같은 여러과의 경우에 확장-적용하였는데, 이때에 관련된 적분 기법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \left( \sum_{j=1}^m f_j(\xi) e^{-(\alpha_j + i\beta_j)\xi} \right) \left( \sum_{k=1}^m g_k(\xi) e^{-(\nu_k + i\delta_k)\xi} \right) d\xi \\ &= \int_0^\infty \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m F_{jk}(\xi) e^{-\theta_{jk}\xi} d\xi \\ &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=j}^m \sum_{i=1}^N K_{jk} W_{jk i} F_{jk}(\xi_{jk i}) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$W_{jk i} = \int_0^\infty L_i(\xi) e^{-\theta_{jk}\xi} d\xi \quad (9)$$

$$L_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left( \frac{\xi_j - \xi}{\xi_j - \xi_i} \right) \quad (10)$$

$$\theta_{jk} = \alpha_j + \nu_k, \quad \delta_{jk} = \beta_j + \mu_k$$

$$F_{jk}(\xi) = f_j(\xi) g_k(\xi)$$

여기서  $j=k$ 일때  $K_{jk}=1$ ,  $j \neq k$ 일때  $K_{jk}=2$

이 적분방법에서는 함수중 최고차항이  $N$ 차 다항식이고 응력파가  $m$ 개의 파로 형성되어 있을 때 이를 정확하게 적분하기 위하여  $(N+1)m(m+1)/2$ 개의 적분점이 요구된다. 그림2에서는 G-L 적분방법과 Modified N-C 적분방법의 효율성을 해석적인 결과에 대한 상대오차가 주어 진 한계내에 있기 위하여 요구되는 적분점의 수로써 비교하였다. 그림에서 보여 주듯이 G-L 적분방법은 주파수가 커질 수록 상당히 많은 적분점을 요구하나 N-C 적분방법은 주파수에 관계없이 적은 적분점으로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 무한요소의 타당성검증

#### 3-1 지표면의 원형강관 기초의 Compliance

지반 위에 놓여 있는 원형강관에 조화하중이 작용할때 무차원주파수에 따른 Compliance 함수를 구하기 위하여 그림3과 같이 내부영역의 유한요소 크기가 다른 2가지 모형을 검토하였다. 무한요소가 놓이는 내부영역과 외부영역 사이의 경계면은 두 경우 전부 기초 반경의 2배 거리에 위치한다. 그림4는 수치해석 결과를 해석적값<sup>14), 15)</sup>과 함께 무차원주파수의 함수로 나타내었다. 결과들

로부터, 다소의 차이는 있으나 무차원주파수( $A_0$ )가 5이하에서는 두 모형 모두 해석적 결과와 잘 일치하고 있으나 그 이상의 주파수에 대하여서는 유한요소의 크기가 작은 모형만 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 유한요소의 크기는 전단파의 파장 보다 적절히 작아야 한다는 점을 고려할 때, 유한요소의 크기를 크게 모형화한 경우가 고주파를 해석하기에 적절하지 못 했다는 것을 알 수 있다. 위의 결과로부터 내부영역을 모형화할 때 유한요소의 크기를 전단파장에 비하여 적절히 작게(전단파장의 약 1/10) 모형하고 무한요소가 놓이는 경계면까지의 거리를 구조물 기초 반경의 약 2배로 하면 전주파수에 대하여 잘 해석할 수 있음을 알 수 있다.

### 3-2 매립된 원통형기초의 Compliance

반 무한 지반에 매립된 원형강체기초를 해석하기 위하여 매립깊이와 기초반경의 비( $H/R_0$ )가 0.25, 0.5, 1.0인 3가지 경우에 대하여 그림 5-a와 같이 모형화하였다. 수직, 수평, 회전에 대한 Compliance를 기초의 바닥 중앙점을 기준으로 하여 구하였다. 해석 결과를 수직방향 Compliance에 대하여서는 무차원주파수  $A_0=0. \sim 5$ . 범위내에 Novak-Beredugo가 구한 결과들<sup>16)</sup>(그림 5-b)과 함께 나타냈고, 수평, 회전에 대한 Coupling Motion의 경우는 무차원주파수  $A_0=1. \sim 2$ . 범위내에 Urlich-Kuhlemerr가 구한 결과들<sup>17)</sup>(그림 5-c, d)과 함께 나타냈다. 이들 결과들은 수직 Compliance의 정적부근 ( $A_0 \approx 0$ .)을 제외하고는 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 지반-구조물 상호작용 해석에의 적용

여기에서 제시한 무한요소를 지반-구조물 상호작용해석에 적용하기 위하여 지진 하중을 받는 원자력발전소 적납구조물에 대하여 그림 6-a와 같이 단순하게 모형화 하여 해석을 수행하였다. 무한요소를 이용한 모형(모형 B, C, D: 그림 6-b, c)을 사용하여 지진해석을 수행한 후 그 결과를 비교하였다. 모형 B는 구조물을 보요소로 단순화하고 지반을 주파수종속 임피던스로 모형화

한 것이며, 모형C, D는 구조물은 축대칭 쉘요소를 사용하고 지반은 유한요소만을 사용하되 모형C는 내부영역을 작게 취하고 모형D는 크게 택하여 모형화한 것이다. 그림 7~9는 지반의 재료적 감쇠조건, 매립깊이, 모형들을 달리하면서 구한 전달함수를 나타냈다. 표 2와 표 3에는 실제지진(EL-Centro 1940: 남북성분)에 대하여 해석한 구조물의 최대응답을 보였다. 구조물의 히스테리틱 감쇠계수를 0.07로 고정하고 지반의 재료적 감쇠계수를 변화시키면서 얻은 결과들(그림 7)로부터 구조물의 거동은 지반의 재료적 감쇠계수에 따라 영향이 큼을 알 수 있다. 또한 여러개의 다른 매립깊이에 대한 해석 결과(그림 8)로부터 구조물의 거동은 매립깊이가 증가함에 따라 크게 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 지표면에 놓인 구조물( $H/R_0 = 0.0$ )의 거동을 다르게 모형화하여 해석한 결과를 나타냈다. 과가 반 무한지반으로 전파되므로 발생하는 에너지는 감소 (Radiation Damping) 효과를 잘 고려할 수 있는 방법인 모형A, B는 대체로 일치하며 합리적인 값을 얻음을 알 수 있지만 유한요소만을 사용한 모형C, D는 에너지 방사 효과를 고려할 수 없으므로 공진을 발생시키는 구조물의 고유진동수 부근에서 높은 Peak을 가지는 불합리한 값을 얻음을 알 수 있다.

실제 지진하중을 받는 구조물의 기동을 해석하기 위하여, 1940년 El Centro 지진(남북 성분, 그림 10)을 입력하중으로 하여 지반의 재료감쇠, 매립깊이, 모형방법 등을 달리하면서 해석한 구조물의 거동을 비교하였다. 지진 입력은 가속도의 Fourier 변환을 사용하였고, 주파수영역해법을 통하여 변환하여 구조물거동의 Fourier 응답을 구한 후, 이를 역 Fourier 변환하여 구조물의 시계열응답을 구하였다. 그림 11은 모형A를 사용하여 구한 구조물의 첨단부 변위와 저면전단력 및 저면모멘트의 시계열응답을 나타낸 것이고, 표 2, 3은 각 해석에서 구한 시계열응답의 최대치를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 전술한 전달함수의 비교결과와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 통상의 유한요소와 유사한 방법으로 무한영역을 모형화하여, 응력파의 방사 효과

를 적절히 고려할 수 있는 동적 무한요소에 대하여 연구하였다. 요소 형성이 보다 효율적인 적분을 수행하기 위하여 Modified Newton Cotes 적분 방법을 Multi-Waves 문제에 맞게 확장하여 적용하는 방법이 제시되었다. 이 적분 방법을 사용할 경우 주파수에 관계없이 적은 적분점으로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 무한요소의 타당성의 검증은 균질-반무한지반의 동탄성 문제를 해석함으로써 수행하였다. 아울러 이방법의 지반-구조물 상호작용 해석에의 적용 예로, 원자력 발전소 격납구조물의 구조모형에 대하여 내진해석을 수행하였다. 본 연구결과를 여기서 사용한 단순한 구조물에 대하여 비교적 정확히 모형화 할 수 있는 방법인 부구조법(모형 B)의 결과와 비교하여 보았을 때, 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 반면 내부영역을 유한요소로 모형화하고 그외부 경계를 고정했을 때는 에너지 방사효과를 고려할 수 없어 거동을 매우 크게 산정함을 알 수 있었다.

여기에서 개발한 무한요소는 적층지반의 경우에도 적절히 적용될 수 있다고 추정되나, 이의 검증을 위한 추가적인 연구가 요망된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원을 받은 목적 기초연구사업(1987-1990)의 일부로서 수행되었다. 동 재단의 지원에 심심한 감사를 표한다.

REFERENCE

1. Lysmer J. and Kuhlemeyer R. L., "Finite dynamic model for infinite media", J. Eng. Mech. Div., ASCE, 95, (EM4), 859-877 (1969).
2. Kausel E., "Forced vibrations of circular foundations on layered media", MIT Research Report R74-11, Soils Publication No. 336, Structures Publication No. 384, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., (1974).
3. Kunar R. R. and Rodriguez L.-Ovejero", A Model with Non-Reflecting Boundaries for Use in Explicit Soil-Structure Interaction Analyses", Earthquake Eng. and Str. Dynamics, Vol. 8, 1980.
4. Gupta S., Penzien J., Lin T. W. and Yeh C. S., "Three-Dimensional Hybrid Modelling of Soil-Structure Interaction", Earthquake Eng. and Str. Dynamics, Vol. 10, 1982.
5. Zienkiewicz O. C., Kelly D. W. and Bettess P., "The Coupling of The Finite Element Method and Boundary Solution Procedures", Int. J. Num. Meth. Engng, 2, 355-375 1977
6. Schmid G., Huh Y., and Estorff O. V., "Evaluation of Compliance Functions of Soil Foundation Systems by Boundary Element Method", Proc. of Eighth World Con. on Earthq. Eng. 1984. July.
7. Bettess P., "Infinite Elements", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, 1977.
8. Bettess, P. and Zienkiewicz, O. C., "Diffraction and Refraction of Surface Waves Using Finite and Infinite Elements", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, 1977.
9. Bettess P., "More on Infinite Elements", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 15, 1980.
10. Chow Y.K., and Smith I.M., "Static and Periodic Infinite Solid Elements", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 17, 1881.
11. Curnier Alain, "A Static Infinite Element", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, 1983.
12. Medina, P., "Modelling of Soil-Structure Interaction by Finite and Infinite Elements", Earthquake Engineering Research Center, 1980.
13. Carnahan Brice and H. A. Luther, James Wilkes O., "Applied Numerical Methods" John Wiley and Sons, Inc. New York, Sydney, Toronto, 1969.
14. Veletsos Anestis S., Wei Yau T., "Lateral and Rocking Vibration of Footings" J. of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 97, No. SM9, Sept. 1971.
15. Luco Juan E. and Westmann Ressel A., "Dynamic Response of Circular Footings", J. of the F. M. D., ASCE Vol. 97, No. EM5, Oc -

tober, 1971.

16. Novak, M. and Beredugo, Y. O., "Vertical Vibration of Embedded Footings", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE, Vol. 98, SM12, December, 1972.
17. Bereduge, Y. O., and Novak, M., "Coupled Horizontal and Rocking Vibration of Embedded Footings", Canadian Geotechnical Journal Vol.

9, 1972.

18. Urlich, C. M., and Kuhlemeyer, R., L., "Couped Rocking and Lateral Vibrations", of Embedded Footings", Canadian Geo. J. Vol. 10, 1973.

(접수일자 : 1989. 7. 22)

표2. 지반의 재료감쇠와 매립깊이에 따른 원자력발전 구조물 응답의 최대치( $\beta_{st}=0.07$  : Model A)

Response H/Ro	$\beta_{so}$	Displacement (cm)			Base shear $\times 10^3$ (ton)			Base moment $\times 10^4$ (ton.m)		
		0.0	0.07	0.15	0.0	0.07	0.15	0.0	0.07	0.15
0.0		7.9	6.5	5.3	6.75	6.04	5.52	2.84	2.41	2.06
0.5		3.4	3.1	2.7	5.43	5.08	4.79	1.74	1.60	1.48
1.0		1.8	1.7	1.5	4.20	4.13	4.03	1.16	1.13	1.10

표3. 모형방법에 따른 원자력발전 응답의 최대치(H/Ro=0.0,  $\beta_{st}=0.07$ )

Response Modelling	Displacement (cm)			Base Shear $\times 10^3$ (ton)			Base moment $\times 10^4$ (ton.m)		
	0.0	0.07	0.15	0.0	0.07	0.15	0.0	0.07	0.15
F.E.M and infinite	7.9	6.5	5.3	6.75	6.04	5.52	2.84	2.41	2.06
Half space	7.6	6.4	5.2	7.00	5.94	5.14	2.65	2.19	1.84
F.E.M only (Model c)	22.1	9.2	7.2	17.9	6.66	5.26	2.22	2.91	2.24
F.E.M only (Model d)	13.2	9.7	7.35	12.8	8.62	7.15	4.72	3.61	2.82

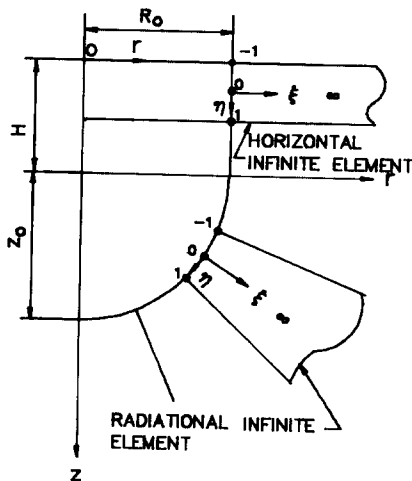
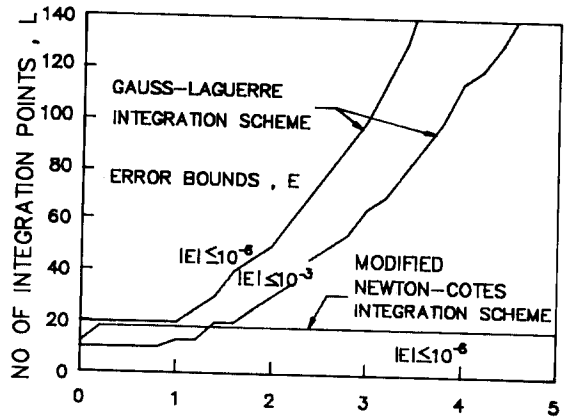
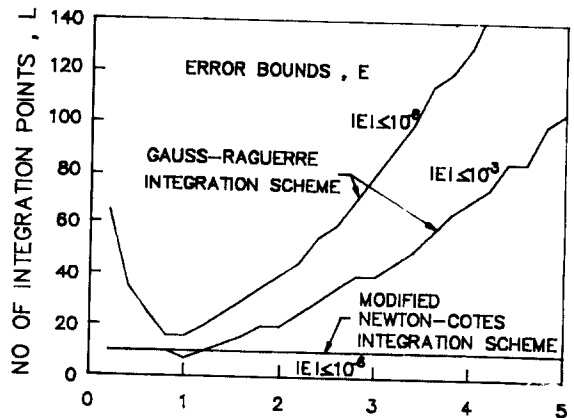


그림1. 전체좌표와 국부좌표의 정의



(a) DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0$

$$f(t) = \{ (1+t)e^{-(1+0.5A_0)t} + (1-t)e^{-(1+0.9A_0)t} + (3+2t)e^{-(1+A_0)t} \}$$



(b) DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0$

$$f(t) = \{ [e^{-\nu^2 t} + \frac{2p\nu}{k^2 + \nu^2} e^{-\nu z} ] e^{-(1+k_r r)t} + e^{-(1+k_s R_0)t} + e^{-(1+k_p R_0)t} \}$$

그림2. 수치적분한 결과가 주어진 오차한계 내에 존재하기 위하여 요구되는 적분점의 수

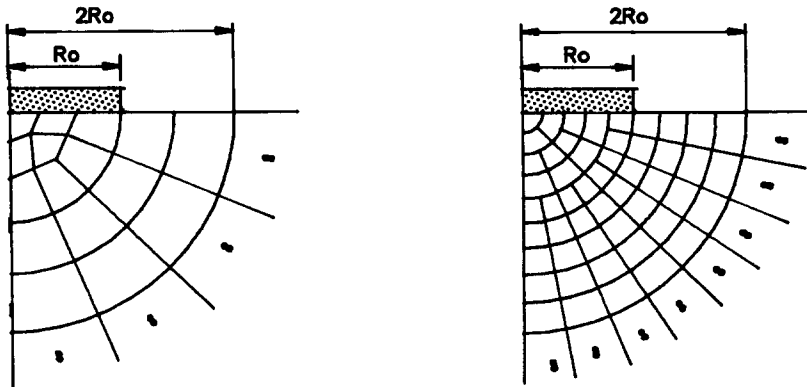
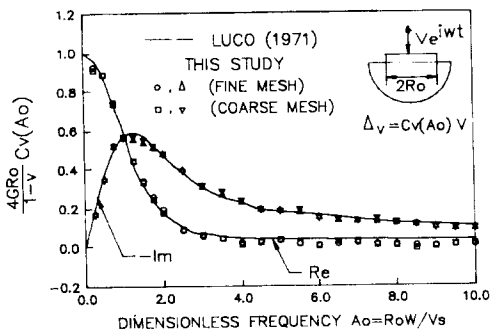
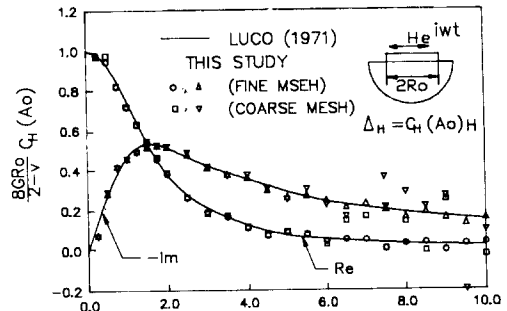


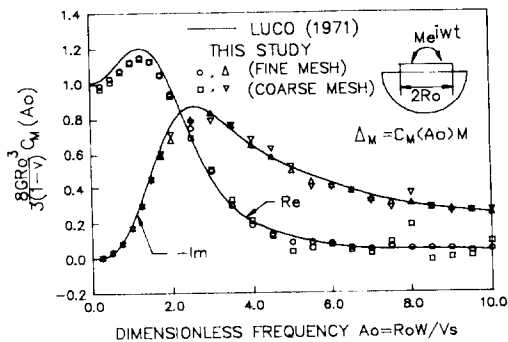
그림3. 반무한 지반위에 놓인 원경강판의 Compliance 함수를 계산하기 위한 모형



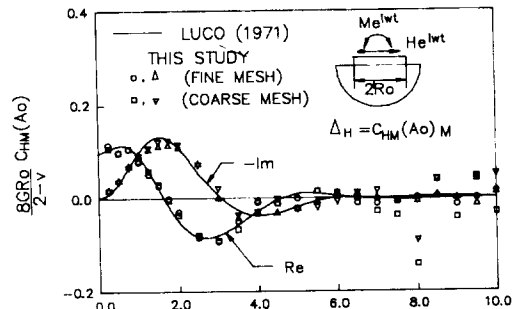
DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0 = RoW/Vs$   
(a) VERTICAL COMPLIANCE FUNCTION



DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0 = RoW/Vs$   
(b) HORIZONTAL COMPLIANCE FUNCTION



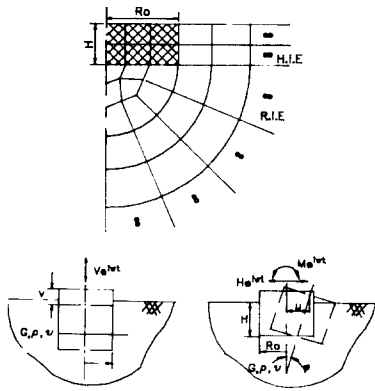
DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0 = RoW/Vs$   
(c) ROCKING COMPLIANCE FUNCTION



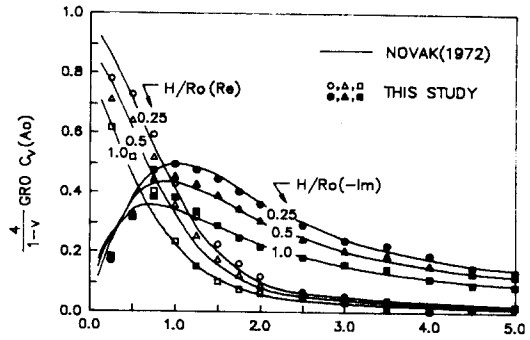
DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0 = RoW/Vs$   
(d) COUPLING TERM BETWEEN HORIZONTAL AND ROCKING

그림4. 반무한 지반위에 놓인 원형강판의 Compliance 함수 ( $\nu = 1/3$ )

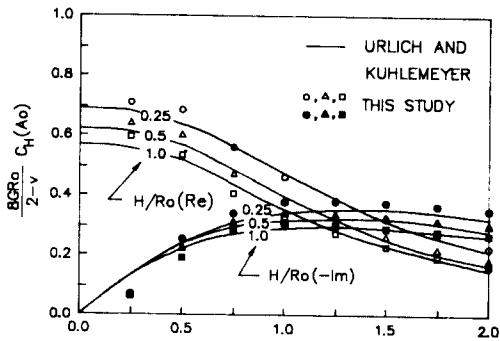




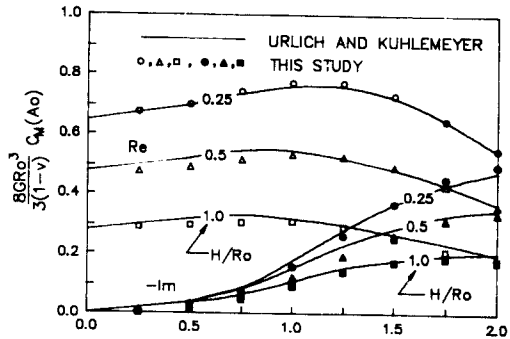
(a) Model



DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0=R_oW/V_s$   
(b) VERTICAL COMPLIANCE FUNCTION FOR EMBEDDED FOOTING( $\nu=1/3$ )



DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0=R_oW/V_s$   
(c) HORIZONTAL COMPLIANCE FUNCTION FOR EMBEDDED FOOTING( $\nu=1/3$ )



DIMENSIONLESS FREQUENCY  $A_0=R_oW/V_s$   
(d) ROCKING COMPLIANCE FUNCTION FOR EMBEDDED FOOTING( $\nu=1/3$ )

그림5. 반무한 지반에 묻힌 원형강체 기초의 모형 및 Compliance 함수( $\nu=1/3$ )

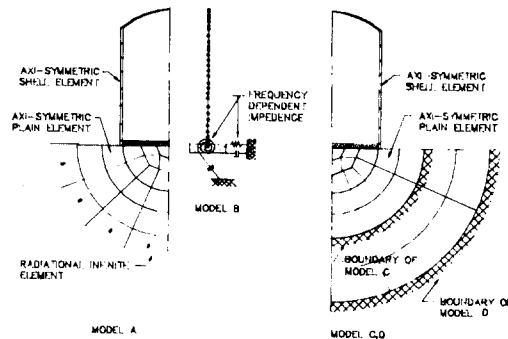
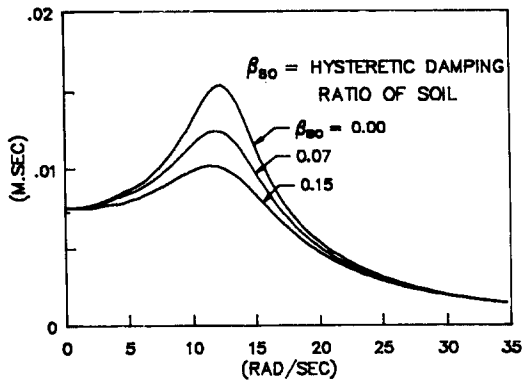
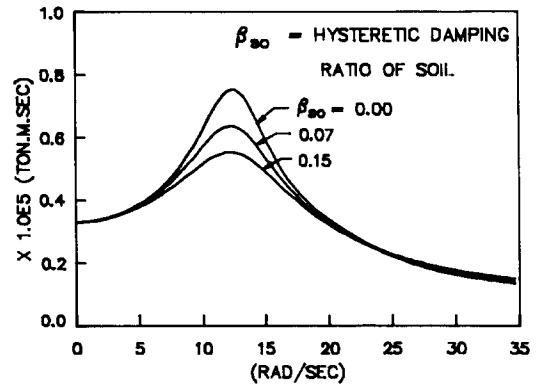


그림6. 수평지진하중을 받는 원자력발전구조물 모형

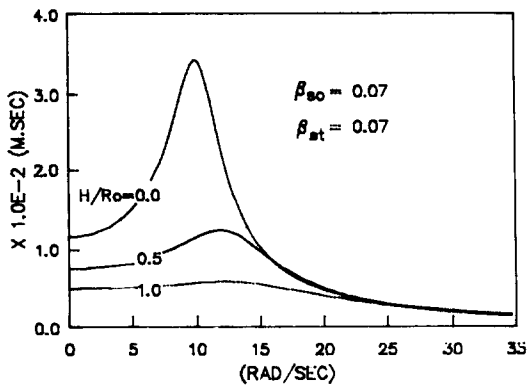


(a) top displacement

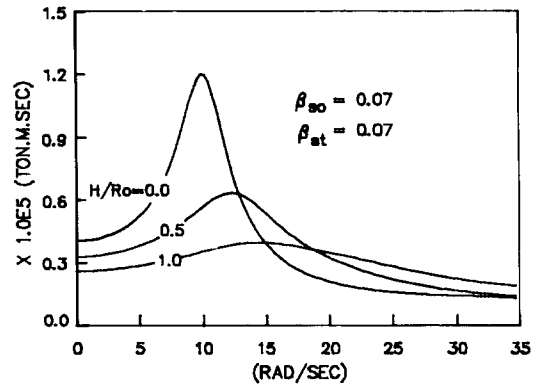


(b) base moment

그림7. 지반의 재료감쇠에 따른 전달함수(Model A,  $\beta_{st}=0.07$ ,  $H/R_o=0.65$ )

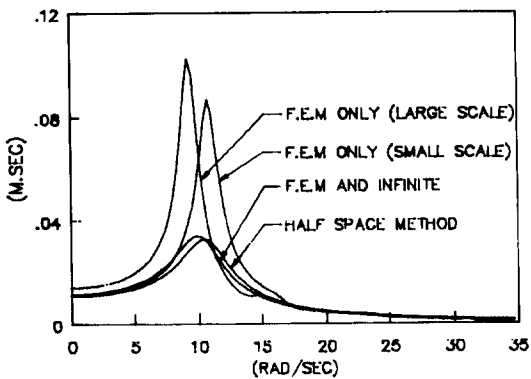


(a) top displacement

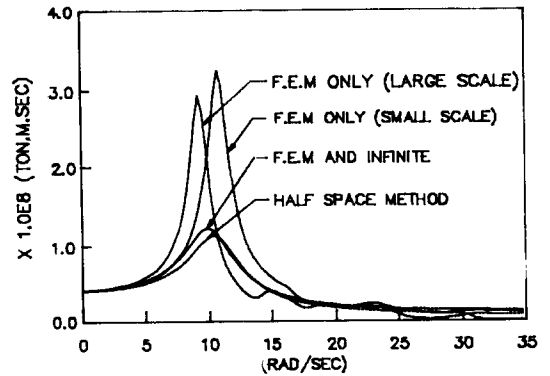


(b) base moment

그림8. 매립깊이에 따른 전달함수(Model A)



(a) top displacement



(b) base moment

그림9. 모형방법에 따른 전달함수( $\beta_{st}=0.07$ ,  $H/R_o=0.0$ )

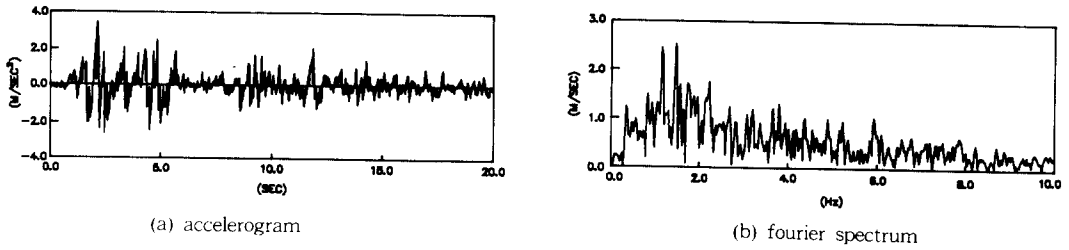


그림 10. El Centro 지진가속도의 시계열 및 Fourier 스펙트럼  
(남-북방향 성분)

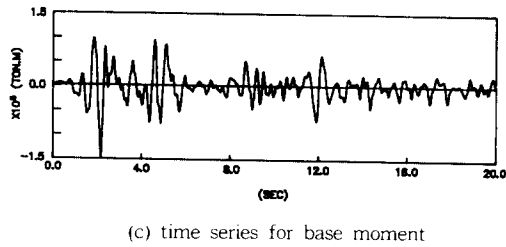
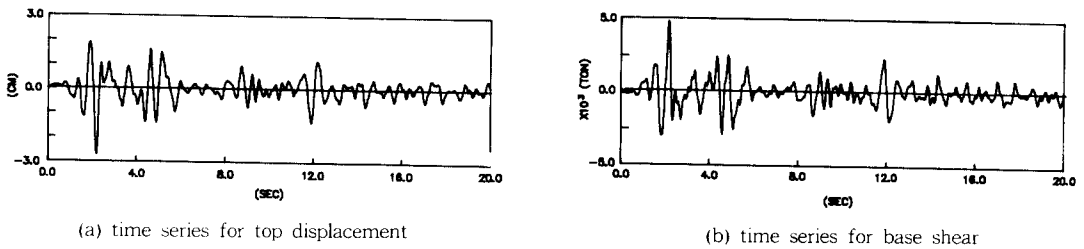


그림 11. 원자력발전구조물의 시계열응답( $\beta_{vi}=0.07$ ,  $\beta_{vj}=0.15$ ,  $H/Ro=0.5$ , Model A)