

# 유한요소-경계요소 조합에 의한 지반-말뚝 상호작용계의 주파수 응답해석

## Soil-Pile Interaction Analysis Using FE-BE Coupling in Frequency Domain

김민규\*      조석호\*\*      임윤목\*\*\*      김문겸\*\*\*\*  
Kim, Min Kyu    Cho, Seok Ho    Lim, Yun Mook    Kim, Moon Kyum

### ABSTRACT

In this study, a numerical method for soil-pile interaction analysis buried in multi-layered half planes is presented in frequency domain using FE-BE coupling. The total soil-pile interaction system is divided into two parts so called far field and near field, beam elements are used for modeling a pile and coupled with plain strain elements for soil modeling. Boundary element formulation using the multi-layered dynamic fundamental solution is adopted to the far field and coupled with near field modeled by finite elements. In order to verify the proposed soil-pile interaction analysis method, the dynamic responses of a pile on multi-layered half-planes are performed and compared with experiment results. Through this developed method, the dynamic response analysis of a pile buried in multi-layered half planes can be calculated effectively in frequency domain.

### 1. 서론

말뚝이 기초로 사용되어지는 전체 구조계의 동적응답은 말뚝의 독립적인 거동으로 나타나는 것이 아니라 인접해 있는 지반 및 기초위의 구조물이 상호작용을 하게 되어 그 양상이 복잡하게 된다. 따라서 전체 구조계의 동적 거동에 대한 정확한 파악을 위해서는 지반과 말뚝 그리고 구조물의 상호작용 효과가 고려된 동적 해석이 수행되어야 한다. 또한 말뚝은 거동시 지반과의 접촉면에서 하중의 방향에 따른 미끄러짐(slip)현상, 분리(gap)현상이 생기게 되며 말뚝의 타입에 의해 말뚝 주변의 지반이 교란되는 연화영역(weak zone)이 발생하여 말뚝의 거동에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 유한요소와 경계요소 조합을 이용한 효율적인 지반-말뚝 상호작용 해석기법을 개발하고 말뚝의 거동시 발생할 수 있는 지반과 말뚝의 변위차를 고려함으로써 분리현상 등의 접촉면 거동특성을 모형화하여 주파수 영역에서의 동적 해석을 수행한다.

### 2. 내부영역과 외부영역의 정식화

#### 2.1 유한요소의 정식화

전체계의 동적 운동방정식은 행렬형태로 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

\* 연세대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원  
\*\* 연세대학교 토목공학과 석사과정  
\*\*\* 연세대학교 토목공학과 조교수, 정회원  
\*\*\*\* 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

$$[M]\{\ddot{\bar{u}}\} + [C]\{\dot{\bar{u}}\} + [K]\{\bar{u}\} = \{\bar{f}\} \quad (1)$$

여기서, 벡터  $\{u\}$ ,  $\{\dot{u}\}$  와  $\{\ddot{u}\}$  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 (1) 을 시간변수에 대해 Fourier 변환을 수행하면 시간의 함수인 하중벡터  $\{\bar{f}\}$  및 변위벡터  $\{\bar{u}\}$  는 식 (2) 와 같이 표현된다.

$$\{u(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{u}(t)\} \exp\{-i\omega t\} dt \quad (2a)$$

$$\{F(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{F}(t)\} \exp\{-i\omega t\} dt \quad (2b)$$

그러므로 식 (1) 은 식 (3) 과 같이 주파수영역에서의 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[S(\omega)]\{u(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (3)$$

식 (3)에서  $[S(\omega)]$  는 임피던스행렬로서 식 (4) 와 같이 표현되는 동적강성행렬을 나타내며  $[K^*]$  는 정적 강성행렬을 나타낸다.

$$[S(\omega)] = [K^*] + i\omega[C] - \omega^2[M] \quad (4)$$

## 2.2 지반-말뚝 상호작용계의 운동방정식

지반-구조물 상호작용계에서 내부영역과 외부영역의 경계면을 제외한 내부영역과 말뚝의 자유도를  $p$  로 나타내고, 내부영역과 외부영역의 경계면에서의 자유도를  $b$  로 나타내면 주파수영역에서의 운동방정식을 식 (5) 와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{pp}(\omega)] & [S_{pb}(\omega)] \\ [S_{bp}(\omega)] & [S_{bb}^p(\omega)] + [S_{bb}^g(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_p(\omega)\} \\ \{u_b(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P(\omega)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

주파수영역에서의 운동방정식 식 (5) 를 내부영역과 외부영역의 경계면에서의 상호작용력  $\{R_b(\omega)\}$  을 사용하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [S_{pp}(\omega)] & [S_{pb}(\omega)] \\ [S_{bp}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_p(\omega)\} \\ \{u_b(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P(\omega)\} \\ -\{R_b(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서,  $\{R_b(\omega)\}$  는 외부영역으로의 파 전파시 내부영역과 외부영역의 경계면에서 작용하는 상호작용력으로 내부영역과 외부영역의 경계면에서의 주파수영역 동적변위강성도행렬  $[S_{bb}^g(\omega)]$  를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{R_b(\omega)\} = [S_{bb}^g(\omega)]\{u_b(\omega)\} \quad (7)$$

## 2.3 집중 질량을 이용한 상부구조물의 모형화 및 경계조건

지반-말뚝 상호작용계에서 상부구조물은 집중 질량 (lumped mass)을 사용하여 모형화 한다. 이 때 상부구조물의 집중질량은 말뚝머리 부분에서 말뚝의 질량과 조합되어지며, 상부구조물이 포함된 전체 지반-말뚝-구조물 상호작용계의 질량 행렬은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} m_{gg} & & & & \\ & \cdot & & & \\ & & m_{gp} & & \\ & & & \cdot & \\ & & & & m_{ps} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $m_{gg}$  는 내부영역에서 지반을 모형화한 유한요소의 질량을 나타내며,  $m_{gp}$  는 지반요소의

질량과 말뚝요소 질량의 조합을, 그리고  $m_{ps}$  는 상부구조물이 조합되는 곳에서의 질량을 나타낸다. 한편, 지반내 근입된 단독 말뚝에서 말뚝의 경사각과 휨모멘트, 그리고 전단력을 다음의 식 (9) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{경사각} = \frac{dx}{dy} \tag{9a}$$

$$\text{휨모멘트} = -EI \frac{d^2x}{dy^2} \tag{9b}$$

$$\text{전단력} = -EI \frac{d^3x}{dy^3} \tag{9c}$$

$E$  는 말뚝의 탄성계수,  $I$  는 말뚝의 단면 2차 모멘트를 나타낸다. 본 연구에서 사용되어진 말뚝 머리에서의 경계조건을 위 식을 이용하여 표현하면 식 (10a) 와 식 (10b) 와 같다.

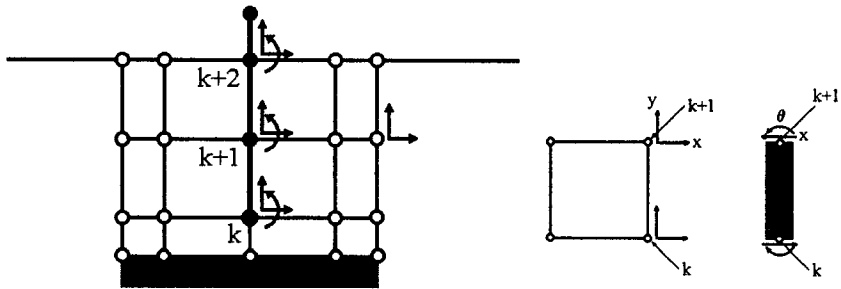
$$[M]_{y=0} = -EI \left[ \frac{d^2x}{dy^2} \right]_{y=0} = 0 \tag{10a}$$

$$[V]_{y=0} = -EI \left[ \frac{d^3x}{dy^3} \right]_{y=0} = 0 \tag{10b}$$

여기서,  $M$  은  $y=0$  일때의 모멘트를, 그리고  $V$  는 전단력을 나타낸다. 말뚝선단부는 움직임이 있는 자유단일 경우에 대해 해석한다.

#### 2.4 지반내 말뚝의 모형화

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용계에 보요소를 도입하므로써 말뚝을 모형화하였다. 그림 1(c) 는 유한요소 해석시 사용되는 보요소의 기본적인 모형을 나타낸다. 본 연구에서 사용하는 하중이 횡방향의 동하중에 국한 되므로 말뚝의 모형에서 각 절점에서 발생하는 변위는  $x$  방향의 변위와  $\theta$  의 두 방향의 변위를 갖게되며  $y$  방향의 변위는 없는 것으로 가정한다. 한편 지반을 모형화하고 있는 평면 변형률 요소는 그림 1(b)에서 보는 바와 같이  $x$  와  $y$  방향의 변위를 가지므로 두요소의 자유도에 차이가 발생하게 된다. 그림 1(a) 에서  $k, k+1, k+2$  절점은 지반과 말뚝의 공유절점이며 따라서 세 개의 자유도를 가진다. 지반요소에 말뚝요소를 도입하게 되면 기존의 강성도 행렬과 질량 행렬에서 공유절점의 영역에  $\theta$  의 영역이 첨가되게 된다. 따라서 말뚝을 도입하기 전의 전체 행렬의 크기가  $N$  이고 공유절점의 수가  $n$  이라고 하면 말뚝 도입 후의 전체 행렬의 크기는  $N+n$  이 되며 그 형태는 공유절점에서  $\theta$  의 자유도가 추가된다.



(a) 전체 상호작용계에서의 자유도      (b) 지반요소      (c) 말뚝요소

그림 1 상호작용계의 자유도

#### 2.5 경계요소법에 의한 외부영역의 모형화

주파수 영역에서의 기본해를 이용한 외부영역의 경계요소 모형화는 김문겸<sup>[1][2][3]</sup> 등의 연구에서

수행된 결과를 이용한다.

### 3. 지반-말뚝 상호작용 해석 및 접촉면 거동특성의 모형화

#### 3.1 내부영역과 외부영역의 조합

유한요소의 동적 강성도행렬  $[S^{FE}]$  와 경계요소의 동적 강성도행렬  $[S^{BE}]$  는 모두 같은 형태의 하중-변위관계를 갖고 있으므로 이들의 조합이 가능하다. 즉, 유한요소와 경계요소간의 접합면에서 공유하는 절점에 대해 강성도행렬과 하중을 조합함으로써 전체 동적 강성도행렬과 하중을 구성하여 식 (11) 과 같이 유한요소의 형태로 나타낼 수 있다.

$$[[S^{FE}]+[S^{BE}]]\{\{u^{FE}\}+\{u^{BE}\}\} = \{\{F^{FE}\}+\{F^{BE}\}\} \quad (11)$$

이로부터 전체 동적 강성도행렬과 하중형태로 나타내면 식 (11) 은 식 (12) 와 같이 된다.

$$[S^G]\{u\} = [F^G] \quad (12)$$

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

#### 3.2 지반과 말뚝의 접합면거동의 모형화

지반의 변위 벡터를  $\{u_s\}$ , 그리고 말뚝의 변위를 나타내는 벡터를  $\{u_p\}$  라고 할 때 직접법을 사용하여 말뚝과 주변 지반의 일부를 유한요소로 모형화한 경우, 말뚝과 지반은 완전히 서로 부착되어진 것으로 간주된다. 이 때 두 변위를 나타내는 벡터는 다음의 관계를 만족하게 된다.

$$\{u_s\} = \{u_p\} \quad (13)$$

그러나 실제 지반-말뚝 상호작용계의 동적 거동에 있어서는 미끄러짐현상 (slip), 분리현상 (gap) 등으로 인해 지반과 말뚝의 변위 사이에는 차이가 발생하게 된다. 이 차이를 고려하기 위해 접촉면에 탄성의 interface 요소를 도입하고, 지반과 말뚝 그리고 interface 요소의 관계를 지반과 말뚝의 변위의 관계식으로 표시하면 다음 식 (14) 로 나타낼 수 있다.

$$[K](\{u_s\} - \{u_p\}) = \{F_p\} \quad (14)$$

여기서,  $[K]$  는 interface 요소의 강성도 행렬로서 특정 깊이에서의 지반의 탄성계수, 말뚝의 형상 등에 영향을 받게 된다. 본 연구에서 사용되는 interface 요소는 탄성으로 식 (15) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \bar{K}(1 + 2i\beta_s) \quad (15)$$

여기서,  $\beta_s$  는 이력거동 감쇠비를 나타내며 지반반력계수  $\bar{K}$  는 식 (16) 으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{K} = \frac{E_s}{D} \quad (16)$$

여기서,  $E_s$  는 특정 깊이에서 지반의 탄성계수를 나타내며,  $D$  는 말뚝의 직경을 나타낸다.

### 4. 수치해석 및 결과분석

본 절에서는 앞에서 개발되어진 유한요소-경계요소 조합 프로그램의 타당성을 검증하기 위해서 다층 반무한 지반에 근입되어진 말뚝에 횡방향 동하중을 가하여 그 응답을 산정하고 기존의 연구 결과 및 실험치와 비교하였다. 비교대상인 Novak<sup>[5]</sup> 의 연구는 이론식을 이용하여 말뚝의 동적응답을 산정하였으며, Guin<sup>[4]</sup> 은 경계요소로 지반을 모형화하여 수치해석을 하였다. Novak 은 지반의 동적 강성도 산정을 위한 방법 중 계산적 이점을 가지는 중첩법 (superposition method)을 이용하여 강성도 행렬을 구하고 이를 통하여 상호작용계에 대한 기본식을 구성하였다. 또한 연화영역

의 고려를 위하여 일정 구간 내의 지반 강성도를 감소시키고 재료감쇠를 증가시키는 방법을 사용하므로써 지반과 말뚝의 접촉면에서의 거동을 만족시킬 수 있는 상호작용계의 동적 이론해를 구하였다. 반면 Guin 은 본 연구에서처럼 반무한 영역의 모형화를 위해 경계요소를 사용하였으며, 지반을 다층의 연속체로 모형화하고 탄성의 보요소를 도입하여 상호작용계를 모형화하였다. 본 연구에서 개발된 수치해석 방법은 Guin 의 방법과 대체적으로 유사하나 말뚝 주변지반을 유한요소를 도입하여 모형화하므로써 Guin 의 해석에서 고려할 수 없는 지반의 거동 파악 및 하중이 말뚝에서 떨어진 주변 지반에 가해질 경우 상호작용계의 동적 해석을 가능하도록 하였다. Marsafawi<sup>[6]</sup> 는 동일한 대상에 대한 동적실험을 실시 하였다.

수치해석 프로그램의 검증을 위하여 그림 2 와 같은 다층 지반에 근입되어 있는 말뚝 머리에 가진기로 하중을 가하여 지표면 수준에서의 말뚝의 동적응답을 구하였다. 사용되어진 말뚝은 콘크리트 말뚝으로 물성은 표 1 에 나타낸 것과 같다. 말뚝의 두부에 0.3 m 의 두께로 설치되어 있는 캡핑 콘크리트는 740 kg 의 하중을 가지며 지반에서 0.1 m 위에 설치되어 있다. 말뚝이 근입되어 있는 지반은 비교적 균질한 물성을 갖는 모래질의 점토(Sandy clay) 이며 각 층에 대한 물성은 표 2 에 나타나 있다. 말뚝에 가해진 하중은 그림 3 의 조화하중(Harmonic vibration) 으로 가진기에 의해 발생된다. 가진기는 캡핑 콘크리트에 부착되어져 가해진 주파수( $\omega$ )의 제곱에 비례하는 하중을 발생시키며, 그림 4 와 같은 구조를 가진다. 실험에 사용되어진 가진기의 발생 가능 주파수는 6 Hz에서 62 Hz 이며 발생 하중은 식 (17) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = (m_e e) \omega^2 \cos \omega t \quad (17)$$

여기서,  $m_e$  는 가진기내 두 개의 추의 무게이며  $e$  는 가진기 팔의 길이이다.

표 1 말뚝의 물성 및 가진기의 구성

내 용		물 성 치	
말 뚝	탄성계수	$E_p$	$19.6 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	포아송비	$\nu_p$	0.3
	밀 도	$\rho_p$	$2.450 \text{ t/m}^3$
	길 이	$L$	7.5 m
	감 쇠 비	$\zeta_p$	0.05
	반 지 름	$R$	0.16 m
	단 면	$A$	$0.0804 \text{ m}^2$
캡핑 콘크리트	단면2차모멘트	$I$	$0.0005147 \text{ m}^4$
	무 계	$M$	0.76 tf
가진기 하 중	형 태	$F(t) = (m_e e) \omega^2 \cos$	
	추의 무게	$m$	0.12 t
	팔의 길이	$e$	1 m

표 2 검증대상 지반의 물성

깊이 (m)	전단파속도 $V_s$ (m/s)	밀도 $\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	탄성계수 $E_s$ (t/m <sup>2</sup> )	포아송비 $\nu_s$	감쇠비 $\zeta_s$
0-1	130	2.060	9236.36	0.3	0.035
1-2	193	2.060	20357.72	0.3	0.035
2-3	200	1.890	20057.14	0.3	0.035
3-4	180	1.890	16246.29	0.3	0.035
4-5	234	2.010	29199.48	0.3	0.035
5-6	272	2.010	39453.12	0.3	0.035
6-7	272	2.010	39453.12	0.3	0.035
7-30	280	2.040	42432.01	0.3	0.035

실험에서는 120 kg · mm 의  $m_e e$  값이 사용되었으며, 결과 그래프에 사용되어지는 응답의 진폭은 식 (18) 과 같이 무차원화 되어진다.

$$A = \left( \frac{m}{m_e e} \right) u \quad (18)$$

여기서,  $u$  는 횡방향으로의 변위이며  $m$  은 캡핑 콘크리트의 무게이다.

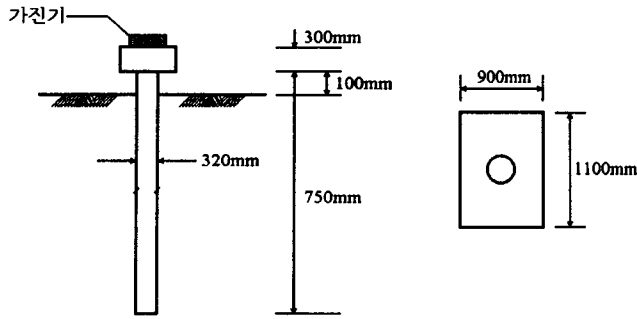


그림 2 검증에 사용된 말뚝의 형상<sup>[5]</sup>

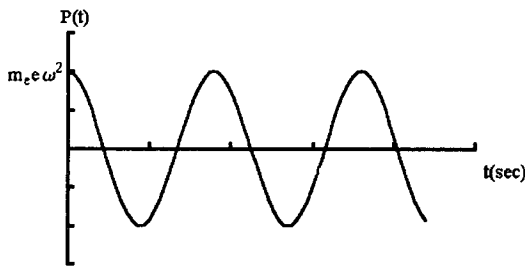


그림 3 작용하중

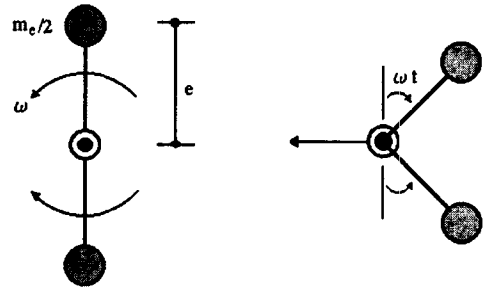


그림 4 가진기의 구성

그림 5는 Novak<sup>[5]</sup>의 이론값과 Marsafawi<sup>[6]</sup>의 실험값, 그리고 본 연구의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 제시된 Novak의 이론값은 말뚝이 지반과 완전 부착된 경우와 연화영역을 고려한 두가지 경우에 대해 보여지고 있다. Novak의 두 경우의 이론값을 비교할 때 연화영역을 고려할 경우 완전부착의 경우에 비해 공명(resonant)이 발생하는 주파수가 9.6 Hz 만큼 감소했으며 공진 주파수에서 무차원화된 진폭의 값이 3.93에서 약 72% 증가한 6.76이 되었다. 이는 말뚝과 지반의 상호 부착력이 감소하여 발생하는 현상으로 사료된다. 한편 본 연구의 수치 해석 결과는 공진주파수가 20 Hz 로써 연화영역이 고려된 이론값 보다는 4.2 Hz 큰 공명주파수를 보였으나 완전부착 되었을 때의 이론값 보다는 5.4 Hz 작은 값을 보였다. 또한 공진주파수에서의 진폭은 연화영역이 고려된 이론식과 1.1 그리고 완전부착시의 이론값과 3.93 차이를 보였다.

그림 6은 동일한 대상에 대하여 Guin의 수치해석 결과와 Marsafawi의 실험값, 그리고 본 연구의 수치 해석 결과를 비교한 것이다. Guin의 수치해석 결과는 공진주파수가 실험값 보다 6.2 Hz 크게 발생했으며 진폭은 실험값 보다 0.98% 더 증가하였으나 거의 일치하였다. 반면 본 연구의 수치해석 결과는 공진주파수는 20 Hz로 Guin의 결과와 4.1 Hz의 차이를 보였으며 진폭은 0.41의 차이를 보여 거의 일치하였다. 실험값과 비교할 때 공진주파수의 경우 실험값과 36.4%의 오차를 보인 Guin의 결과 보다 실험값에 근접하였으나 공진주파수에서의 진폭이 실험값 보다 18.2% 감소한 결과를 보였다. 그림 7은 말뚝을 평면변형률 요소로 모형화하여 동일 구조계를 해석한 결과로서 본 연구에서 보요소를 도입하여 말뚝을 모형화한 방법의 타당성을 살펴보기 위해 제시하였다. 해석에서 말뚝을 평면변형률 요소로 모형화 하였을 경우 공진주파수 25 Hz에서 6.54의 진폭이 발생하여 실험값과 각각 39.66%, 19.56%의 오차를 보여 보요소를 도입한 본 연구의 결과와 비교할 때 공진발생 주파수에서 27.93%, 그리고 공진주파수에서의 진폭에서 16.24% 더 큰 오차를 보였다. 또한 공진주파수 전후의 주파수대에서 실험결과와 다른 양상을 보였으며 특히 공진주파수 이후 주파수대에서 수렴하는 값이 타 방법에 의한 결과보다 2.09 배에서 3.14 배 큰 값을 나타냄으로써 말뚝을 평면변형률 요소로 모형화 할 때 실제 말뚝의 거동과는 차이가 있음을 보여주었다.

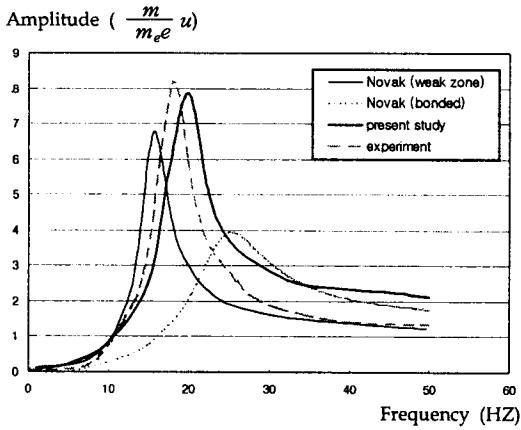


그림 5 Novak 의 결과와의 비교

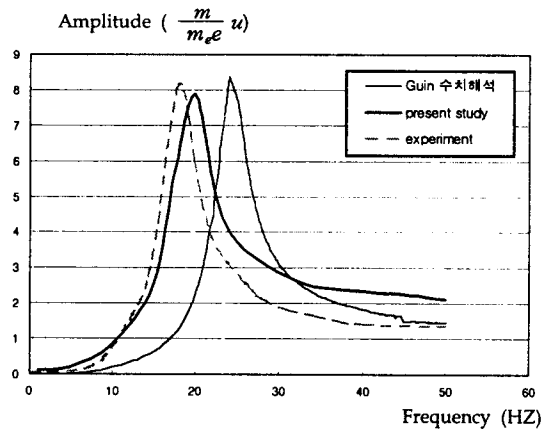


그림 6 Guin 의 수치해석 및 실험값과의 비교

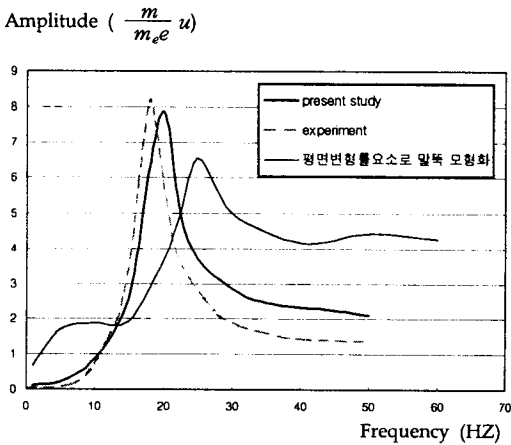


그림 7 평면변형률 요소를 사용한 경우와의 비교

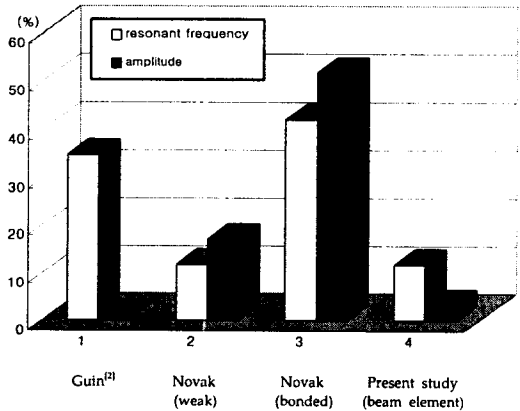


그림 8 각 해석 방법과 실험값과의 오차

앞의 내용을 해석방법에 따른 공진 발생 주파수와 공진주파수에서의 진폭으로 정리하면 표 3 및 그림 8 과 같다. 표에서와 같이 보요소를 도입한 본 연구의 수치해석 결과는 공진주파수에 있어서는 Novak 의 연화영역을 고려한 이론값과 함께 실험값에 가장 근접한 결과를 얻었으며 공진 주파수의 진폭에 있어서도 실험값과 3.32 %의 오차를 보여 Guin 의 수치해석값 다음으로 실험값과 일치하는 경향을 보였다. 본 연구에서 발생한 오차는 실제 구조계를 수치해석에 적용하는 과정에서 발생하는 것으로 분석된다. 본 연구를 통하여 3차원 거동을 하는 말뚝을 2차원 상에서 해석할 수 있는 기법을 제시하였고 추후에 3차원 해석기법의 개발을 통하여 그 타당성을 제시할 수 있을 것으로 보인다.

표 3 해석방법에 따른 공진주파수와 공진주파수에서의 진폭

		공진주파수(Hz)	실험과의 오차(%)	진폭	실험과의 오차(%)
실험값		17.9	0	8.13	0
Novak 이론값 (완전부착)		24.1	34.6	3.93	51.66
Novak 이론값 (연화영역고려)		15.8	11.7	6.76	16.85
Guin 의 수치해석		24.1	34.6	8.27	0.98
본 연구	말뚝 (평면변형률 요소)	25	39.7	6.54	19.56
	말뚝(보요소)	20	11.7	7.86	3.32

## 5. 결 론

본 연구에서는 경계요소 해석을 이용하여 외부영역을 모형화하고, 보요소와 평면변형률요소의 조합으로 구성되어 있는 내부영역과 조합하여 층상 지반-말뚝 상호작용해석 알고리즘을 개발하였다. 본 수치해석 알고리즘을 다층반무한 지반상에 포함된 말뚝으로 지지되어지는 구조계에 적용하여 그 타당성 및 효율성을 검토하였다.

- (1) 지반을 모형화한 평면변형률요소에 말뚝을 모형화하기 위한 보요소를 도입하고 조합하여 내부영역을 구성하였다. 이를 경계요소로 모형화된 외부영역과 조합하므로써 반무한체의 방사조건을 효과적으로 고려할 수 있는 지반-말뚝 상호작용계의 해석을 위한 수치해석기법을 개발하였다. 또한 말뚝과 지반의 경계에서 발생할 수 있는 변위차를 고려할 수 있도록 interface 요소를 도입하여 지반과 말뚝의 접촉면에서의 거동을 만족할 수 있는 해석기법을 개발하였다.
- (2) 본 연구에서 개발한 수치해석 기법을 다층반무한 지반과 상호작용을 갖는 말뚝에 적용하여 동적 해석을 수행하고 이를 Guin 의 수치해석 결과 및 Novak 의 이론값, 그리고 Marsafawi 의 실험값과 비교하여 본 연구방법의 타당성을 검증하였다. 또한 말뚝을 평면변형률 요소로 모형화하였을 때와 비교하므로써 보요소 도입의 타당성을 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학재단 특정기초연구 “정·동적 상호작용을 고려한 해상말뚝기초의 설계기법” 연구 내용의 일부이며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

1. 김문겸, 이종우, 조성용, “2차원 다층 반무한해를 이용한 지하구조계의 동적 경계요소 해석,” 한국 지진공학회 논문집, 제 1 권, 제 4 호, pp. 59-68, 1997. 12.
2. 김문겸, 이종우, 이필규, 김민규, “접근해를 이용한 동적 2차원 다층 반무한 경계요소,” 대한 토목학회 논문집, 제 18권, 제 1-5 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. Guin, J. and Banerjee, P.K., “Coupled Soil-Pile-Structure Interaction Analysis under Seismic Excitation,” *Journal of Structural Engineering*, Vol.124, 1998, pp.434-444.
5. Novak, M., “Piles under Dynamic Load,” Proceedings of 2nd International. Conference on Recent Advances in *Geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, Mar., 1991, pp.250-273.
6. El-Marsafawi, H., Han, Y.C., and Novak, M., “Dynamic Experiments on Two Pile Groups,” *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.118, No.4, 1992, pp.576-592.