

지반 - 구조물 상호작용을 고려한 진동기계기초의 해석법 연구

An Analytical Study of Vibrating Machine Foundations
Considering Soil - Structure Interactions

이 인 모*¹
Lee, In - Mo
이 석 원*²
Lee, Seok - Won
박 종 관*³
Park, Jong - Kwan

Abstract

For analyzing the vibrating machine foundations, the proper estimation of the ground impedance functions is imperative, and the dynamic analyses, which account for soil-structure interactions, are required. While the aspect ratio of the foundations have a great influence on the impedance functions, those applicable only to the circular foundations have mostly been used in design. Therefore, firstly in this study, the impedance functions which can be applied to the arbitrarily shaped foundations and to the embedded foundations are studied. Secondly, the computer programs are made, which can account for soil-machine-foundation interactions, for use in the design of the vibrating machine foundation. Then, the dynamic analyses are performed using the various impedance functions proposed, and the responses of the machine foundations are obtained and compared among others.

Main conclusions drawn this study can be summarized as follows: 1) Whether the frequency-independent or frequency-dependent impedance function is used, the dynamic responses show little differences by the choice of the impedance function for the horizontal and rocking modes; however, these show great differences in the vertical mode.

2) Comparing the surface foundations with embedded foundations, the dynamic responses show nearly constant and safe values in the embedded foundations for the horizontal and rocking modes. However, for the vertical mode, the dynamic responses show great differences.

*¹ 정희원, 고려대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*² 前 고려대학교 대학원 토목공학과

*³ 정희원, 서울산업대학 토목공학과 부교수

동하중을 받는 진동기계기초의 동적해석을 수행하기 위해서는 지반의 임피던스함수의 적절한 산출이 필수적이며, 회전기계-기초-지반의 상호작용이 고려된 동적해석이 요구된다. 이제까지 지반의 임피던스함수는 주로 원형기초에 한하여 제시되어 왔으나, 기초의 형상은 실제로 지반의 임피던스함수에 중요한 역할을 한다. 그러므로, 본 연구에서는 여러가지 형상 및 매립된 기초에 적용할 수 있는 임피던스함수를 제시하였다. 그리고, 제시된 임피던스함수를 바탕으로, 회전기계-기초-지반의 상호작용이 고려된 동적해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 이용하여 예제해석을 통하여 각종 임피던스함수의 적용에 따른 기계기초의 응답을 비교 검토하였다.

본 연구의 주된 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 주파수독립 임피던스함수와 주파수종속 임피던스함수를 이용한 결과를 비교해 볼 때, 수평방향과 회전방향에 대해서는 동적응답이 커다란 차이를 보이지 않으나, 연직방향 운동에 대해서는 상당한 차이를 보인다.

2) 표면기초와 매립기초를 비교해 본 결과, 매립기초에 있어서 수평방향과 회전방향에 있어서는 동적응답이 거의 일정한 값에 도달하므로 기초가 어느 정도 매립된다면 안전측에 들어간다고 볼 수 있다. 그러나, 연직방향에 있어서는 매립여부에 따라 상당한 차이를 보인다.

1. 서 론

기존의 국내에서 설계 및 시공된 발전설비시설의 회전기계기초는 대부분이 암반상에 놓여 있었기 때문에 기계진동시 지반의 동특성에 대한 영향을 크게 고려할 필요가 없었다. 그러나, 국토의 협소로 인해 차후의 발전설비는 매립지 등 연약지반위에 건설 할 수 밖에 없는 처지에 놓이게 될 수 있는 점을 감안하여 본 연구에서는 차후의 설계시에 고려될 지반상에 놓여있는 회전기계기초의 효과적인 설계가 이루어지도록 하며 설계에 사용할 수 있는 기계-기초-지반의 연계를 고려한 체계적인 기초 모델을 제시해 주기 위하여 다음에 대해 집중적으로 연구하였다.

첫째, 동하중을 받는 회전기계의 기초는 주위의 여러가지 구속상황에 따라 몇 가지 형태로 설계 되어지고 있으며, 각각의 형태는 구속 상황에 의하여 조금씩 다른 운동방정식을 수반하게 된다. 이 중 이제까지의 설계에서는 상부 구조와 하부구조를 따로 생각하여 설계하는 비

구속 시스템(uncoupled system)으로 주로 취급하였는데, 본 연구에서는 상부와 하부구조물을 연결하여 지반과 구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 모델을 설계에 적용할 수 있도록 하였다.

둘째, 동역학적 해석시에 필수요소인 지반의 임피던스함수가 이제까지 주로 원형기초에 한하여 제시되어 왔고, 실제상의 여러가지 형상을 가진 기초를 이 원형기초에 적용시키기 위해서 등가원형 방법을 사용하여 왔다. 그러나, 이러한 방법들을 실제로 설계에 적용시키기에는 많은 문제점과 실제의 동적응답과는 많은 차이를 보이고 있는 것이 사실이다. 따라서, 여러가지 형상을 가진 기초에 적용되는 주파수종속 임피던스함수를 제시하였다.

셋째, two-lumped mass model을 이용한 회전기계기초의 동적해석을 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하여, 각종 매개변수 해석을 통하여 그 모델의 신빙성 및 주파수종속 임피던스함수의 적용성을 검토하여 차후 설계에 적용할 수 있도록 하였다.

2. 지반 -기계 -기초를 연계한 동적 해석

2.1 회전기계기초의 종류 및 수학적 모델링

동하중을 받는 회전기계의 기초는 기초가 놓여있는 주위의 여러가지 구속상황에 따라 다음과 같이 6가지 형태로 설계되어 진다.

- ① 블록 형태 (block type)
- ② 매트 형태 (mat type)
- ③ 내부 완충재 (inertia block)를 사용하는 형태
- ④ 캔틸레버 (cantilever)에 의하여 지지되어 있는 형태
- ⑤ 고정 빔 (fixed beam)에 의하여 지지되어 있는 형태

⑥ 패데스틀 형태 (pedestal type)

이 여섯가지 형태중 본 연구에서 취급하고자 하는 형태는 ⑥의 형태로 실제 설계에서 주중을 이루는 형태이다. 이 페데스틀 (pedestal) 형태의 설계는 이제까지 그림 1과 같이 상부는 상부대로 절점을 여러 개로 나누어 하부는 고정되었다고 가정하여 풀며 (그림 1 a), 하부는 하부대로 상부구조물 일체를 하나의 질량점으로 보고 푸는 (그림 1 b), 소위 상부, 하부를 비구속 (uncoupled)시켜서 푸는 방법을 택하여 왔다.

그러나 본 연구에서는 상부구조물과 하부구조물이 서로 연관되어 영향을 미치므로 그림 2와 같이 상부구조물과 하부구조물을 각각의 질량점으로 묶어서 흡과 구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 모델 즉 two-lumped mass Model을 택하여 이를 해석할 수 있는 프로그

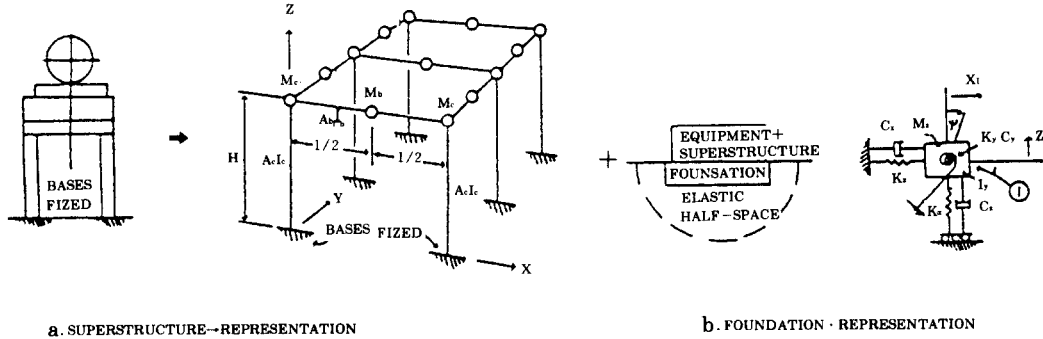


그림 1 Uncoupled superstructure & foundation model

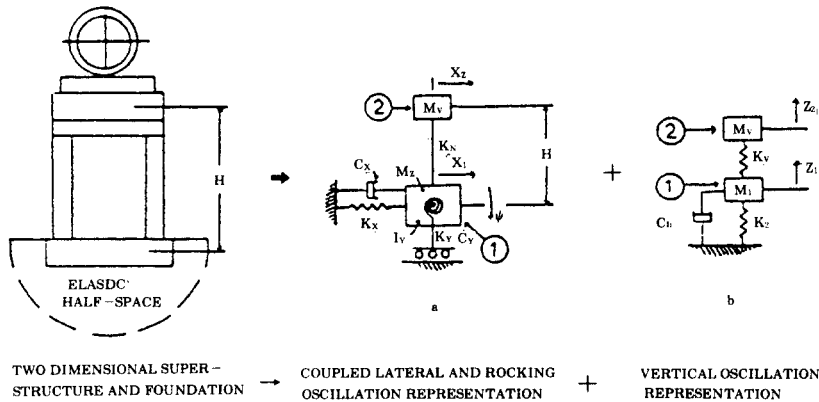


그림 2 Two-Lumped Mass Model (Coupled)

램을 개발하고자 한다.

그림 2에서 수평방향진동과 회전방향진동에 대한 구속효과를 a에 나타내었고, 연직방향진동에 대하여 b에 나타내었다.

또한, 각각의 진동방향에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

수평 방향 :

$$\begin{aligned} m_U \ddot{x}_2 + k_h (h_2 - x_1 - \psi H) &= F_{x2}(t) \\ m_1 \ddot{x}_1 + C_{x1} \dot{x}_1 + k_x x_1 - k_h (x_h - x_1 - \psi H) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

회전 방향 :

$$I_\psi \ddot{\psi} + C_\psi \dot{\psi} + m_U \ddot{x}_2 H + k_\psi \psi = F_{z2}(t) \cdot H \quad (2)$$

연직 방향 :

$$\begin{aligned} m_U \ddot{z}_2 + k_v (v_2 - z_1) &= F_{z2}(z) \\ m_1 \ddot{z}_1 + C_{z1} \dot{z}_1 + k_v (v_1 - z_2) + k_z z_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 주파수 영역(Frequency Domain)에서의 운동방정식

동하중을 받는 회전기계기초는 일반적으로 아래 식4와 같은 운동방정식을 수반하며, 이 운동방정식은 여러가지 수치해석방법에 의하여 해석이 이루어진다.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (4)$$

여기에서,

- [M] : 질량 매트릭스(mass matrix)
- [C] : 댐핑 매트릭스(damping matrix)
- [K] : 강성 매트릭스(stiffness matrix)
- {U} : 변위 벡타(displacement vector)
- {F} : 힘 벡타(forcing vector)

주파수영역 (frequency domain)에서, 전술한 운동방정식의 동적해석은 푸리에 해석(fourier analysis or complex response analysis)으로 [1] 행하여지며, 이 해석을 통하여 식4는 다음과 같은 운동방정식으로 표현된다.

$$([K^*] - \omega^2[M])\{U\} = \{F\} \quad (5)$$

여기에서,

$$[K^*] : \text{수정된 강성 매트릭스} (= [K] + i\omega[C])$$

ω : 기계 회전 진동수(rad/sec)

[M] : 질량 매트릭스(mass matrix)

{U} : 변위 진폭 벡타(displacement amplitude vector)

{F} : 힘 벡타(forcing vector)

위의 식 5에서 나타난 힘 요소(forcing function, $\{F\} = \{F_0 e^{i\omega t}\}$)에 단위 지수적 힘요소(unit exponential forcing function, $F = e^{i\omega t}$)의 개념[6]을 도입 한다면, 식5는 아래 식6과 같이 표현된다.

$$([K^*] - \omega^2[M])\{H(\omega)\} = \{1\} \quad (6)$$

여기에서, $\{H(\omega)\}$ 는 단위하중에 대한 변위 진폭 벡타(displacement amplitude vector or complex frequency response)를 말한다.

위에서 구한 $H(\omega)$ 를 이용하여 실제로 구하려는 힘요소(forcing function, $\{F\} = \{F_0 e^{i\omega t}\}$)에 대한 응답은 아래 식7을 이용하여 구할 수 있다.

$$\{A\} = |H(\omega)| \times \{F_0\} \quad (7)$$

여기에서,

{A} : 변위 진폭 벡타(displacement amplitude vector)

{F₀} : 힘 진폭 벡타(forcing amplitude vector)

|H(ω)| : {H(ω)}의 복소 절대값

2.3 Two-Lumped Mass Model의 동적 해석

앞절에서 나타내었듯이, 상부구조물과 하부 구조물이 서로 연관되어 영향을 미치는 형태를 two-lumped mass model이라 하며, 이 형태에 대한 구속효과를 고려한 운동방정식은 식1, 2, 3에서 나타낸 바와 같다.

앞절 2.2의 기본 이론을 토대로, 위의 운동방정식들은 식4를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} M_U & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_U & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_1 & 0 \\ M_U H & 0 & 0 & 0 & I_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{z}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{x1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{z1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 & -K_h & 0 & -K_h H \\ 0 & K_v & 0 & -K_v & 0 \\ -K_h & 0 & K_x + K_h & 0 & K_h H \\ 0 & -K_v & 0 & K_v + K_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ z_2 \\ x_1 \\ z_1 \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{z2} \\ 0 \\ 0 \\ -F_{x2} H \end{bmatrix} \quad (8)$$

위의 관계식 8을 주파수 영역에서 동적해석

을 수행하기 위하여 식5를 이용하여 푸리에 (fourier)해석을 행하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_b - \omega^2 M_u & -K_b & & -K_b H \\ & K_v - \omega^2 M_u & & -K_v \\ -K_b & ((K_b + K_x) + i\omega C_x) - \omega^2 M_1 & & K_b H \\ & -K_v & ((K_v + K_z) + i\omega C_z) - \omega^2 M_1 & \\ -\omega^2 M_u H & & (K_s + i\omega C_s) - \omega^2 I_s & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_v \\ U_x \\ U_z \\ \psi_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_b \\ F_v \\ 0 \\ 0 \\ F_s H \end{bmatrix} \quad (9)$$

결국, 위의 관계식 9를 이용하여 two-lumped mass model에 대한 주파수 영역에서의 동적해석이 이루어지며 또한 동적해석을 위한 컴퓨터 프로그램이 개발되었다.

2.4 회전기계기초의 동적 해석을 위한 컴퓨터 프로그램

본 연구에서는 two-lumped mass model을 이용하여 회전기계기초의 동적해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램

램은 앞에서 표현한 관계식 9에, 힘요소로서 단위 지수적 힘요소(unit exponential forcing function)를 도입하여, 응답으로 $|H(\omega)|$ 를 구하게 된다. 이 과정에 대한 플로우 차트(flow chart)는 그림 3과 같다.

3. 회전기계기초 지반의 임피던스함수

무질량의 강체판이 지반을 스프링(spring)과 대쉬포트(dashpot)로 표현한 시스템에 놓여있다고 가정할 때 힘-변위 관계식에 나타나는 계수가 임피던스함수로서, 연직, 수평 및 회전 변위를 독립으로 가정할 때 힘-변위 관계식을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P \\ H \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{K}_z(\omega) + i\omega C_z(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & \bar{K}_x(\omega) + i\omega C_x(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \bar{K}_\phi(\omega) + i\omega C_\phi(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ U \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기에서 $\bar{K}(\omega)$ 및 $C(\omega)$ 는 각각 동적강성과 발산감쇠를 나타내는 임피던스함수로서 이를 합리적으로 추정하는 것이 전체 기초의 거동을 구하는 데 필수요소이다.

기계기초의 형상은 일반적으로 원형이 아닌, L/B(기초의 길이와 폭의 비)의 변화에 따른 여러가지의 형태로 이루어져 있으나, 기존의 발표된 많은 임피던스함수는 주로 진동수에 무관한 원형 기초에 대하여 정리되어 왔고, 따라서 여러 형상을 가진 기초를 가장 기본적인 원형 기초에 적용시키기 위해서 등가 원형 방법[3]을 사용하여 왔다. 그러나, 일반적으로 이 등가 원형 방법을 L/B가 2이상인 기초에 적용시키기에는 여러가지 문제점[7]이 있다.

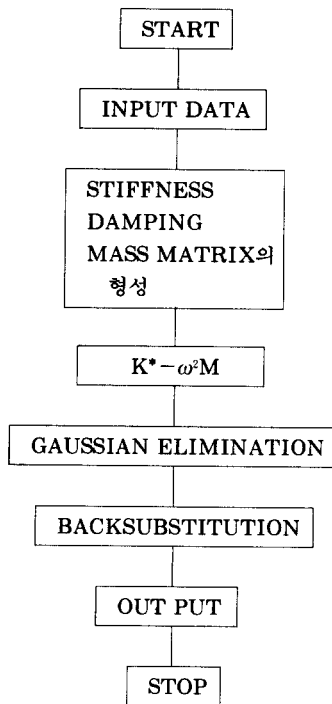


그림 3 Flow Chart

본 연구에서는 이러한 여러 형상을 가진 기초에 대한 표면기초와 매립기초의 동적강성(dynamic stiffness)과 발산감쇠(radiation damping)를 이제까지 여러형태로 발표된 문헌들을 토대로 정리하였다[8]. 특히, 기존의 해석에서는 주로 시간 영역(time domain)에서 해석이 가능하도록 주파수 독립 임피던스함수를 사용하여 왔으나, 본 연구에서는 주로 주파수영역(frequency domain)에서 해석이 가능하도록 주파수 종속으로 임피던스함수를 나타내었다.

3.1 표면 기초(Surface Foundation)

3.1.1 동적 강성(Dynamic Stiffness, \bar{K})

일반적으로 표면기초에 있어서 동적 강성

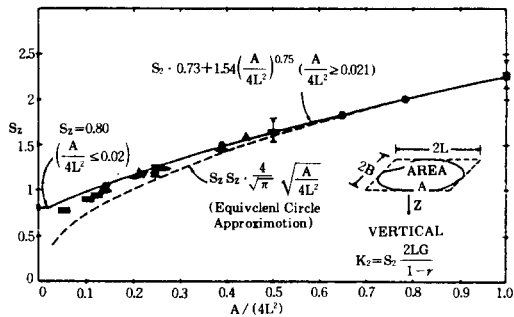
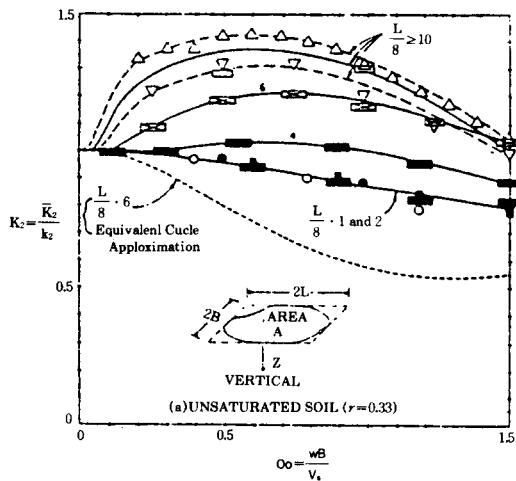


그림 4 Dimensionless static stiffness parameter, S_z



(\bar{K})을 구하는 데 있어서는 다음과 같은 단계를 밟게 된다.

- ① 그림 4에서 예시한 바와 같이 형상비 ($A/4L^2$)의 변화에 따른 무차원 정적강성변수(dimensionless static stiffness parameter) S_z 를 구하고, 이를 이용하여 정적강성(static stiffness) K 를 구한다. 여기에서, A 는 기초의 면적을 L 은 기초의 길이의 반을 표시한다.
- ② 그림 5에서 예시한 바와 같이 무차원 진동수 $\omega_0 (= \omega B/V_s)$ 에 따른 동적강성계수(dynamic stiffness coefficient) k 를 구한다. 여기에서 ω 는 기계의 Excitation Circular Frequency(rad/sec)를 V_s 는 지반의 전단파 속도를 B 는 기초 폭의 반을 표시한다.
- ③ 위에서 구한 정적강성(K)과 동적강성계수(k)를 이용하여, 동적강성(\bar{K})은 다음과 같은 관계식으로 구할 수 있다.

$$\bar{K} = K \times k \quad (11)$$

특별히, 연직방향운동에 있어서 무차원 정적강성변수와 동적강성계수를 구하는 도표를 그림 4와 그림 5에 예시하였다.

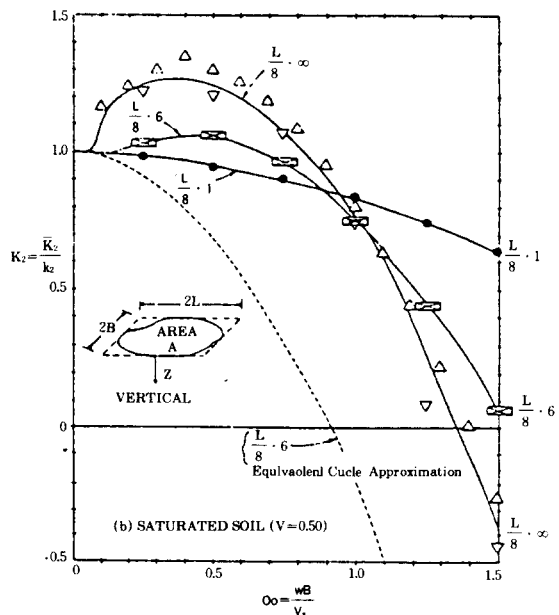


그림 5 Dynamic stiffness coefficient, k_z

3.1.2 발산 감쇠(Radiation Damping, C)

발산 감쇠(C)를 구하는 데 있어서 다음과 같은 단계를 밟게 된다.

- ① 그림 7에서 예시한 바와 같이 무차원 진동수 $a_0 (= \omega B/V)$ 와 형상의 변화(L/B)에 따른 무차원 변수(dimensionless parameter) \bar{C} 를 구한다.
- ② 위에서 구한 무차원 변수 \bar{C} 를 이용하여 발산 감쇠(radiation damping) C는 다음과 같은 식으로 구하여 진다.

$$C = \bar{C} \cdot \rho VA \quad (12)$$

여기에서,

ρ : 기초 지반의 밀도(mass density)

V : 각 진동 모델에 대한 적정한 전달 파속도 위에서 사용한 무차원 변수는 그림 6에서 나타낸 바와 같이, 파 전달각 θ 를 고려하기 위해서 사용되어 지는데, 기초 진동 현상이 1차원 [4]인 경우 θ 가 '0'의 값을 가지나, 기초 진동

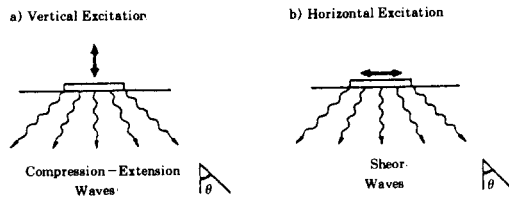


그림 6 Wave propagation and radiation damping

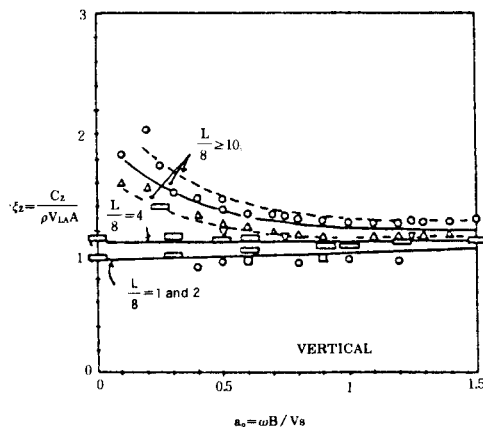


그림 7 Dimensionless parameter, \bar{C}_z

현상이 2,3차원인 경우 파 전달각 θ 는 '0'보다 크게 나타나게 된다. 따라서 $C/(\rho VA) \neq 1$ 인 경우가 되므로, 2,3차원 기초진동에서는 무차원 변수 \bar{C} 를 고려해 주어야 한다. 그런데, 무차원 변수 \bar{C} 는 낮은 진동수에서 많은 변화를 보이나, 높은 진동수에서는 파 전달각 θ 가 거의 '0'에 접근하므로 무차원 진동수와 형상의 변화에 관계없이 '1'의 값 [5]에 접근함을 보인다.

특히 연직방향운동에 대한 무차원변수를 구하는 도표를 그림 7에 예시하였다.

3.2 매립 기초(Embedded Foundation)

반무한 탄성체 지반상의 진동기계기초에 대한 임피던스함수는 기초의 매립(Embedment)으로 인하여 크게 영향을 받는다. 따라서, 기초 설계시에 이 매립효과에 대한 고려는 필수적이다.

일반적으로, 매립기초는 매립깊이 D에 반하여, 실제로 기초의 측벽이 지반과 완전히 접촉되어 있는 깊이 즉 연직 측벽(sidewall-contact)의 높이 d에 따라 다음의 3가지 형태로 분류된다.

- ① 연직 측벽의 높이 d가 '0'인 경우 : 연직 측벽 접촉이 없으며, 트랜치(trench)기초라 한다.
- ② 연직 측벽 높이 d가 매립 깊이 D와 같은 경우 : 매립 기초의 전면으로 지반과 접촉되어 있으며, 완전 매립 기초라 한다.
- ③ 연직 측벽 높이 d가 '0'과 매립 깊이 D 사이에 있는 경우 : 부분 매립기초라 한다.

일반적으로, 이러한 3가지 형태의 기초 각각에 대하여 동적강성 \bar{K} 와 발산감쇠 C는 따로 고려하여야 한다.

3.2.1 동적 강성(Dynamic Stiffness, \bar{K})

매립기초의 동적강성(\bar{K}_{emb})은 표면기초의 동적강성(\bar{K}_{sur})을 구하는 방법과 비슷하게, 다음과 같은 단계를 밟게 된다.

- ① 앞의 3.1.1절에서 구한 표면 기초의 정적강성(K_{sur})을 이용하여, 매립으로 인한 3가지 효과를 고려해 줌으로써, 매립기초의 정적강성(K_{emb})을 구한다.
- ② 무차원 진동수 a_0 , 형상비(L/B), 그리고 깊

이비(D/B)의 변화에 따른 매립기초상의 동적강성계수를 k_{emb} 를 구한다.

- ③ 위에서 구한 매립기초의 정적강성 K_{emb} 과 동적강성계수 k_{emb} 를 이용하여 매립기초의 동적강성은 다음과 같은 관계식으로 구한다.

$$\bar{K}_{emb} = K_{emb} \times k_{emb} \quad (13)$$

위에서 말한 바와 같이, 표면정적강성이 매립으로 인하여 바뀌어지는 3가지 효과는 다음과 같다.

- ① 표면으로부터 매립깊이 D에 있는 기초저면은 표면기초와는 다르게 일반적으로 더욱더 단단한 지반에 하중을 전달하게 된다. 즉, 깊이가 깊은 곳에 있는 지반일수록 더욱더 단단하므로, 다른조건이 동일하다면 매립깊이 D가 증가함에 따라 정적강성 K가 증가하는 현상을 보인다. 따라서, 실제 매립기초의 정적강성(K_{emb})을 구할 시에는 우선 지반이 균일 한가를 검토한 후 매립깊이에서의 대표적인 흙의 계수(soil modulus)를 정하여야 한다.
- ② 트랜치 효과(trench effect) : 트랜치상에 놓여있는 매립기초의 여러가지 방향에 대한 변형량은 매립깊이 D위에 놓여있는 흙으로 인하여 발생하는 연직응력(normal stress)과 전단응력(shear stress)에 의하여 표면에 놓여있는 기초의 변형량에 비하여 무척 작게 된다. 따라서, 이러한 효과를 고려한다면 표면정적강성(K_{sur})는 다음과 같이 증가하게 된다.

$$K_{tre} = I_{tre} \times K_{sur} \quad (14)$$

여기에서, I_{tre} : 매립깊이에 따른 보정계수

- ③ 측벽 접촉 효과 : 매립기초의 연직측벽이 주변의 지반과 접촉되어 있다면, 가해주는 하중의 일부분이 접촉되어 있는 연직측벽을 통하여 전달되게 된다. 따라서, 트랜치상에 놓여있는 기초와는 달리 추가적인 하중이 지반에 전달되므로 정적강성 K는 증가하게 된다. 이러한 효과를 고려한다면, 트랜치 기초상의 정적강성(K_{tre})은 접촉면적의 크기에 따라 다음과 같이 증가하게 된다.

$$K_{emb} = I_{wall} \times K_{tre} \quad (15)$$

여기에서, I_{wall} : 접촉면적의 크기에 따른 보

정계수

3.2.2 발산 감쇠(Radiation Damping)

매립기초의 발산감쇠(C)는 표면기초에 있어서의 발산감쇠와는 달리 연직측벽의 접촉면을 따라 압축-인장파(compression-extension wave, V_{oe}) 혹은 전단파(shear wave, V_s)가 발산되므로, 매립접촉면이 증가함에 따라 감쇠계수가 커지게 된다. 따라서, 매립기초의 발산감쇠는 표면기초의 발산감쇠에 연직측벽접촉에 있어서의 발산감쇠 영향을 고려해 주면 된다.

4. 매개변수 해석 및 결과

본 연구에서는 다음의 3가지 매개변수 해석을 통하여 앞에서 제시한 Two-Lumped Mass Model의 신빙성 및 주파수종속 임피던스함수의 적용성에 대하여 검토하였다.

- ① 표면기초에 있어서 임피던스함수를 주파수 독립[2]과 주파수종속으로 각각 사용하였을 때, 기계의 운전 진동수(operating frequency)가 변화함에 따른 진폭 요소(amplification factor or complex frequency response)의 차이를 알아보았다.
- ② 기초가 매립됨에 따라 일어나는 표면기초와의 진폭 요소(amplification factor)의 차이를 동적전단계수의 변화에 따라 알아보았다.
- ③ 기초의 형상이 정사각형(L/B=1)에서 좁고 긴 기초(L/B=10)로 변화함에 따라 나타나는 진폭요소(amplification factor)의 변화를 알아보았다.

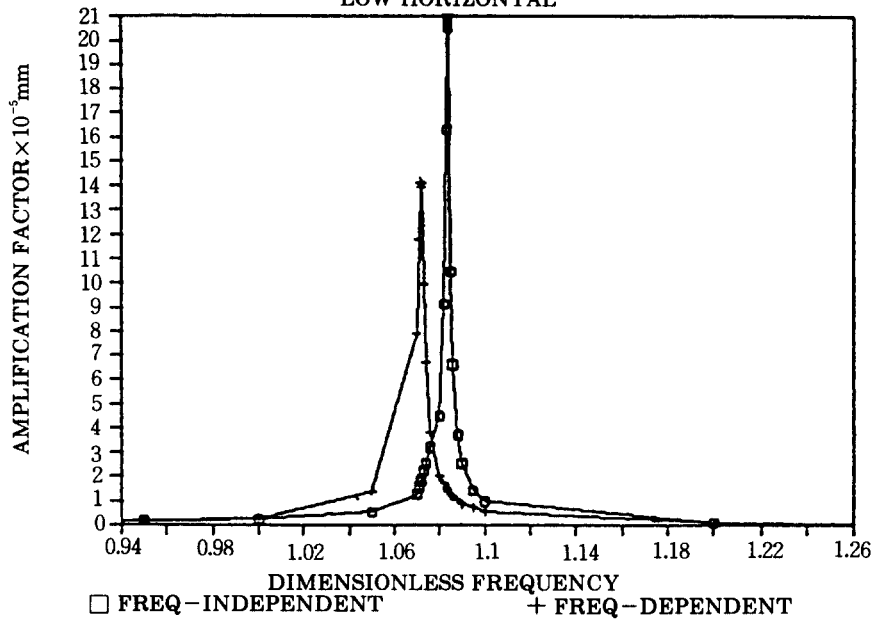
4.1 표면기초상 임피던스함수의 주파수 독립과 주파수종속의 비교

지반의 동적전단계수를 $6.0 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2$ 로 일정하게 놓고, 기계의 운전 진동수(operating frequency)를 변화해 가면서 나타나는 각 운동 방향에 대한 복소수 진동 응답(complex frequency response, $|H(\omega)|$), 즉 진폭 요소(amplification factor)를 각각 그림 8에 나타내었다.

여기에서, 부호 □는 임피던스함수를 주파수 독립으로 구하여 동적응답을 구한 것이고, 부호 +는 주파수종속에 의한 동적응답을 나타낸다.

SURFACE FOUNDATION

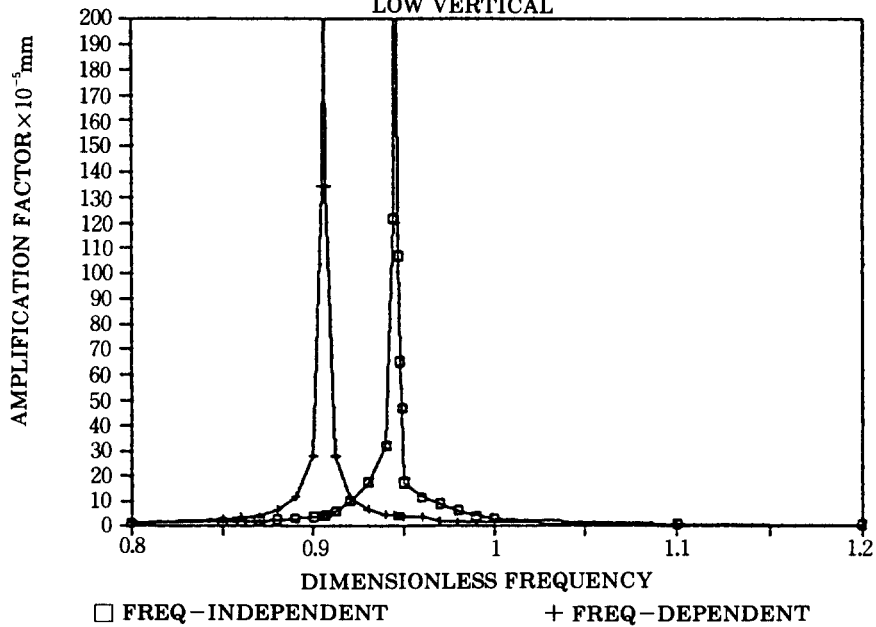
LOW HORIZONTAL



(a)

SURFACE FOUNDATION

LOW VERTICAL



(b)

SURFACE FOUNDATION

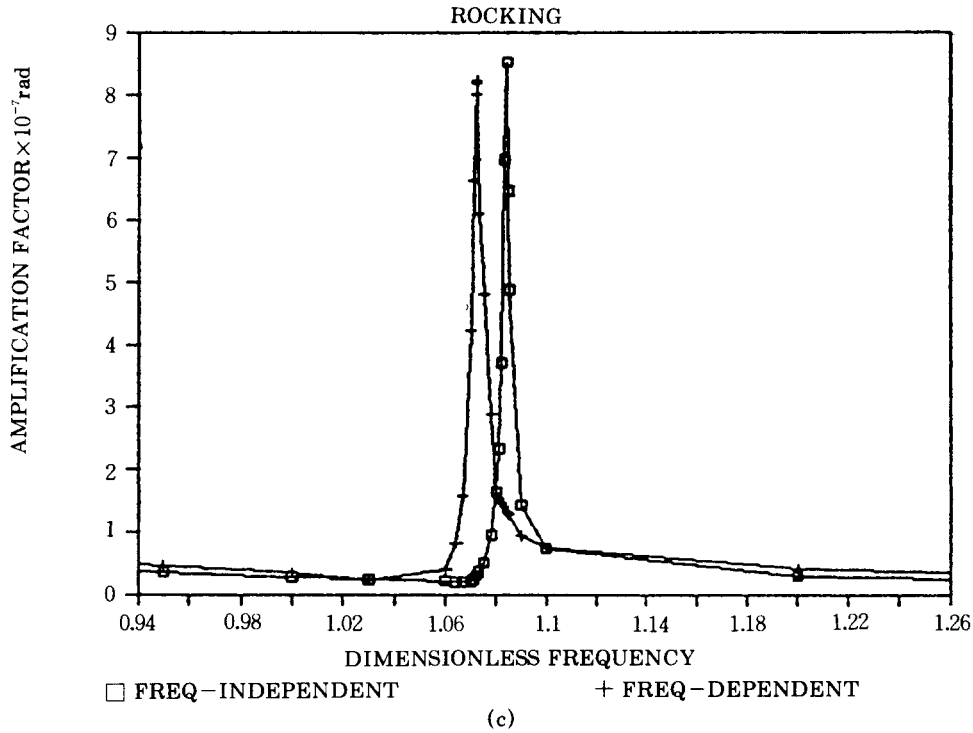


그림 8 표면기초상의 주파수 독립과 주파수 종속의 비교

그림에서 보듯이 수평방향과 회전방향에 대해서는 두가지 결과가 커다란 차이를 보이지 않으나, 연직방향 운동에 대해서는 피크값이 나타나는 무차원 진동수(a_0)가 상당한 차이를 보인다. 실제로 기존에 건설된 대부분의 회전기계 기초의 무차원 진동수는 주파수독립 임피던스 함수를 사용할 수 있는 무차원 진동수 ($0 < a_0 < 1$)보다 상당히 큰 값을 가지고 있으므로, 기존에 사용되어진 주파수독립의 임피던스 함수를 사용할 시는 연직방향 운동에 대해서 세심한 주의가 요구된다.

4.2 표면 기초와 매립 기초의 비교

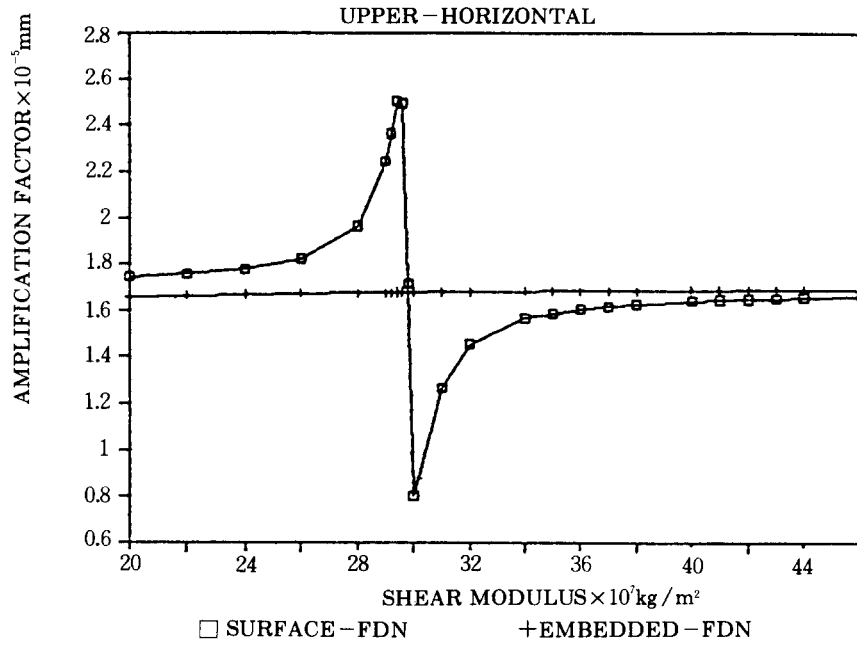
기초가 지표면상에 놓여있는 경우와 4m 정도 매립되어 있는 경우의 진폭요소(amplifi-

cation factor)의 변화를 그림 9에 나타내었다. 두 경우 모두 기계의 운전 진동수(operating frequency)를 일정하게 두고, 동적전단계수를 변화해 가면서 진폭요소(amplification factor)를 구하여 보았다.

여기에서, 부호 □는 기초가 표면상에 놓여있는 경우의 동적응답을 표시하며, 부호 +는 매립되어 있는 경우를 나타낸다.

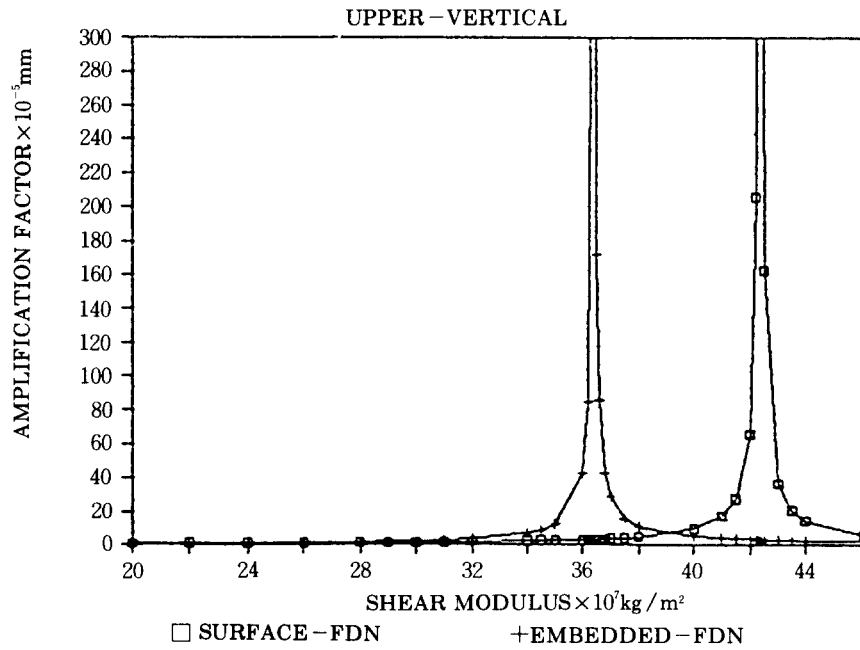
그림에서 보듯이 수평방향과 회전방향에 대해서는 매립에 의하여 커다란 영향을 받아, 동적전단계수가 변화해 가더라도 진폭요소(amplification factor)는 거의 변화가 없이 일정함을 알 수 있다. 그러나, 연직방향 운동에 대해서는 피크치를 표시하는 동적전단계수가 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서, 기초가 어느

SURFACE VS EMBEDDED FDN



(a)

SURFACE VS EMBEDDED FDN



(b)

SURFACE VS EMBEDDED FDN

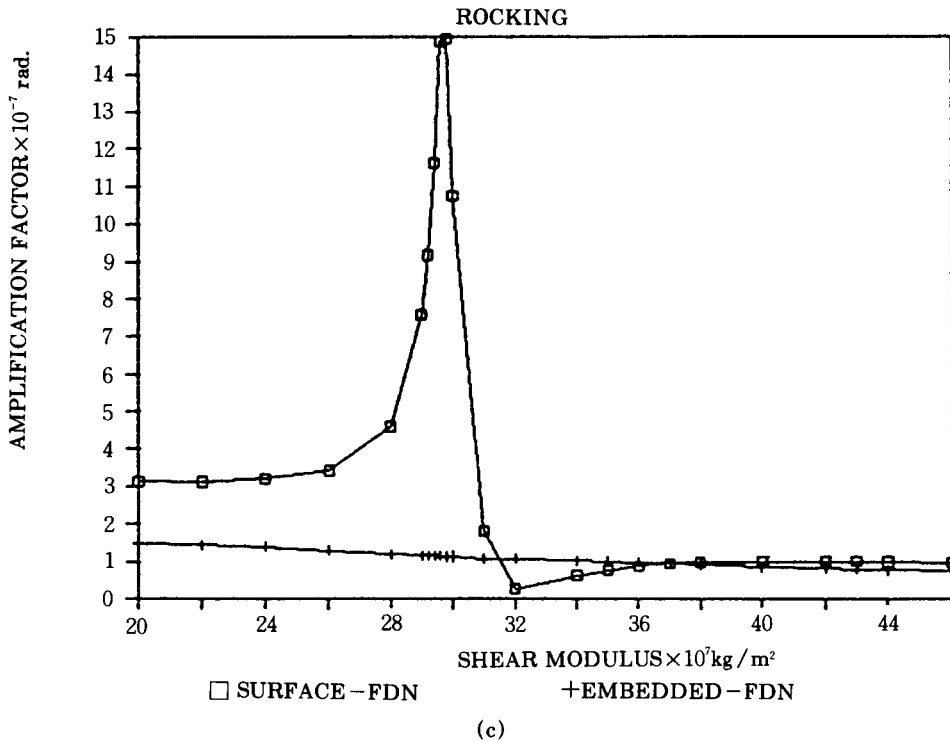


그림 9 표면기초와 매립기초의 비교

정도 매립 된다면 수평방향과 회전방향에 대해서는 안전측에 들어간다고 판단된다.

4.3 기초 형상비(L/B)의 변화에 따른 비교

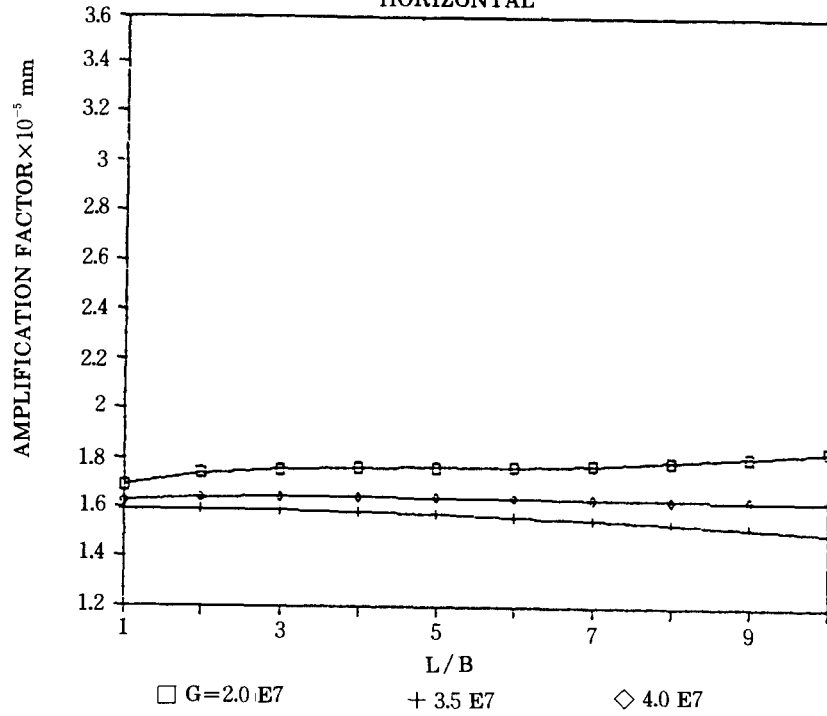
일정한 기계의 운전 진동수(operating frequency)하에서 기초의 형상이 바뀔(L/B : 1-10)에 따라 나타나는 진폭요소(amplification factor)를 각 동적전단계수에 따라 그림 10에 나타내었다.

여기에서, 부호 □는 지반의 동적전단계수가 $2.0 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2$ 를 나타내며, 부호 ◇, △는 각

각 $3.5 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2$, $4.0 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2$ 일때의 형상비의 변화에 따른 진폭요소(amplification factor)를 나타낸다. 그림에서 보면 수평방향 및 회전방향에 대해서는 형상비의 변화에 의한 영향이 그리 크지 않으나, 연직방향 운동에 대한 동적응답은 각각의 동적전단계수에 따라 연직방향운동의 피크치를 가지는 무차원 진동수가 존재함을 알 수 있다. 따라서 기초의 형상이 바뀔에 따라 피크치를 나타내는 무차원 진동수가 변화하므로 연직방향 운동의 동적응답에서 피크치를 나타내는 부분에 주의를 기울여야 한다.

L/B VS AMP.

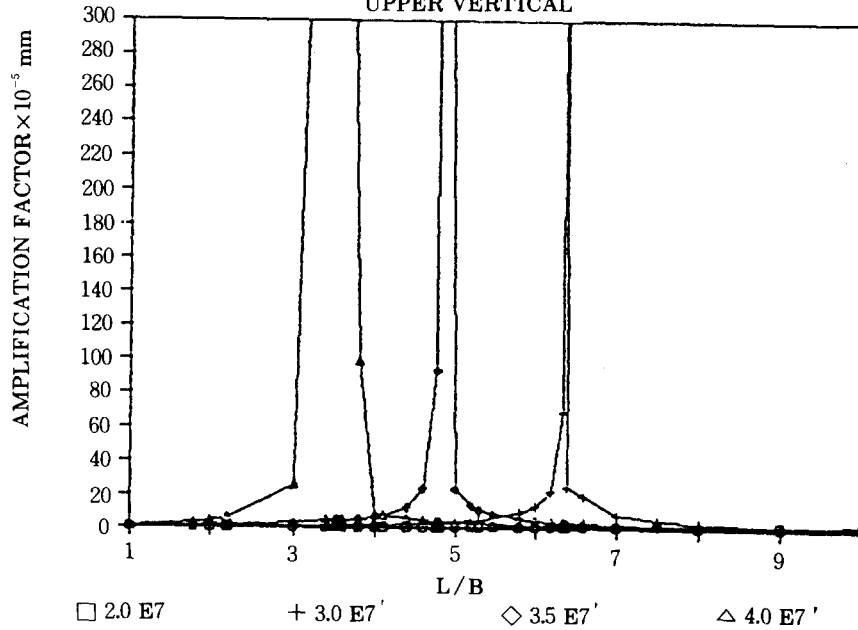
HORIZONTAL



(a)

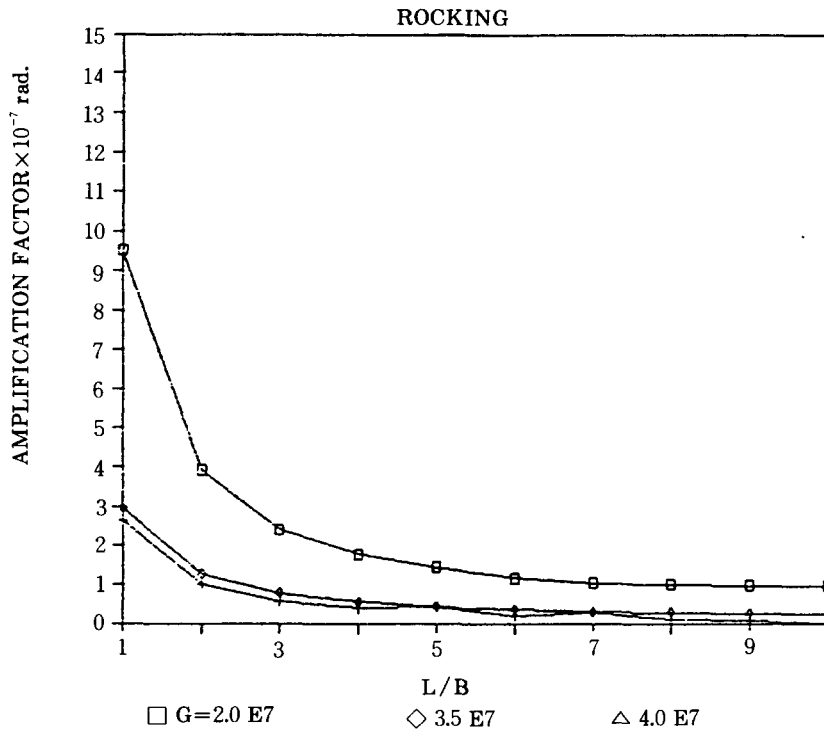
L/B VS AMP.

UPPER VERTICAL



(b)

L/B VS AMP.



(c)

그림 10 기초형상비(L/B)의 변화에 따른 비교

5. 결 론

본 연구에서는 페데스틀 형태 (pedestal type)의 회전기계기초의 설계에서 흙과 구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 체계적인 수학적 모델링을 제시하였으며, 이제까지 사용되었던 지반의 임피던스함수가 원형기초로 가정된 경우 및 주파수 독립의 경우에도 국한 되었었는데, 본 연구에 각종의 기초형상에 골고루 적용할 수 있고 또한 주파수 종속인 임피던스함수를 제시하여 주파수 영역 해석 및 불규칙한 형상을 가진 기계기초의 설계에 사용할 수 있도록 하였다. 특히 매립 기초에의 고려를 합리적으로 하고자하였다. 제시된 임피던스함수를 바탕으로,

two-lumped mass model을 이용하여 회전기계기초의 동적해석을 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 각종 매개변수 해석을 통하여 그 모델의 신빙성 및 주파수종속 임피던스함수의 적용성을 검토하여 차후 설계에 적용할 수 있도록 하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 표면기초에 있어서 임피던스함수를 주파수 독립과 주파수종속으로 각각 구하여 동적응답의 차이를 구하여 본 바, 수평방향과 회전방향에 대해서는 커다란 차이를 보이지 않으나, 연직방향 운동에 대해서는 피크값이 나타나는 무차원 진동수(a_0)가 상당한 차이를 보인다. 기존에 건설된 대부분의 회전기계기초의 무차원 진동수가 주파수독립 임피던스함수를 사용할 수

있는 무차원 진동수($0 < a_0 < 1$)보다 상당히 큰 값을 가지고 있는 점을 고려하여 볼 때 설계시 이에 대한 고려가 요구된다.

2) 기초가 지반에 매립됨으로 인한 표면기초와 동적응답의 차이를 구해본 바 수평방향과 회전방향에 대해서는 매립에 의하여 커다란 영향을 받아 진폭요소(amplification factor)는 거의 변화가 없이 일정하게 나타나나, 연직방향 운동에 대해서는 피크치를 나타내는 무차원 진동수가 아주 적은 값으로 상당히 옮겨 감을 알 수 있었다. 따라서, 기초가 어느 정도 매립된다면 수평방향과 회전방향에 대해서는 안전측에 들어간다고 판단된다.

3) 기초의 형상이 바뀐(L/B : 1-10)에 따라 동적응답을 구해본 바 연직방향 운동에 대한 동적응답은 각각의 동적전단계수에 따라 연직방향 운동의 피크치를 가지는 무차원 진동수가 존재함을 알 수 있었다. 따라서 기초의 형상이 바뀐에 따라 피크치를 나타내는 무차원 진동수가 변화하므로 연직방향 운동의 동적응답에서 Peak치를 나타내는 부분에 주의를 기울여야 한다.

감사의 글

본 연구는 KOPEC의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 귀 회사에 감사드리며 특히 연구에 많은 지원을 아끼지 않으신 김상환 박사, 구기욱 과장, 장영선씨 및 KEPCO의 이종림 선임 연구원에게도 감사의 말씀을 드린다.

참고 문헌

1. "Analyses for Soil-Structure Interaction Effect for Nuclear Power Plant" (1980), Report by the Ad Hoc Group on Soil-Structure Interaction of the Committee on Nuclear Structure and Materials of the Suructure Division of ASCE.
2. Das, B. M. (1983), "Fundamentals of Soil Dynamics," Elsevier Science Publishing Co., Inc.
3. Luco, J. E., and Westmann, R. A. (1971) "Dynamic Response of Circular Footings," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.97, No. EM5, pp. 1381~1395.
4. Lysmer, J., and Richart, F. E., Jr. (1966), "Dynamic Response of Footing to Vertical Loading," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. Vol. 92, No. SM1, pp.65~91
5. Massa, F. (1972), "Radiation of Sound," American Institute of Physics, McGraw-Hill Book. Co., New York, pp. 3~139
6. Paz, M.(1985), "Structural Dynamics," Van Nostrand Reinhold Company Inc.
7. Dobry, R., and Gazetas, G. (1986), "Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Foundations," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No.2, Feb., pp.109~135.
8. 이 석원(1991), "지반-구조물 상호작용을 고려한 진동기계기초의 해석법 연구", 고려대학교 석사학위 논문.

(접수일자 1991. 3. 13)