

회전기계-기초의 상호작용을 고려한 지진해석

Seismic Analysis of Rotating Machine-Foundation System

김기봉*

Kim, Ki Bong

국문요약

여섯 성분의 지진에 의한 지반가속도를 받는 회전기계-기초시스템의 거동을 해석하기 위해 회전기계-기초시스템을 회전원판, 회전축, 윤활유막 베어링, 주각, 그리고 뼈대기초로 구성된 것으로 이상화한다. 이때 회전기계-기초의 동적거동을 나타내는 지배운동방정식은 Gyroscope 효과와 Coriolis 효과, 윤활유막의 동적특성 그리고 지반의 병진과 회전거동을 고려하여 얻는다. 지반의 회전거동, Gyroscope 효과, 그리고 Coriolis 효과들이 회전기계-기초시스템의 전체거동에 미치는 영향을 해석예제를 통해 고찰한다. 해석결과 회전기계-기초시스템의 지진해석에 있어서 지반의 회전거동 성분과 Gyroscope효과와 Coriolis효과의 영향을 포함하여야함을 알 수 있다.

ABSTRACT

The seismic behaviour of rotating machine-foundation systems subjected to six-component nonstationary earthquake ground accelerations is analyzed. The rotating machine-foundation system is idealized by using discs, rotating shaft, fluid-film journal bearings, pedestals, and space frame foundation. Thus, governing equations of motion for the rotating machine-foundation system are obtained by considering Gyroscopic effect, Coriolis effect, dynamic characteristics of fluid-film journal bearings, and translational and rotational motions of seismic rigid base. The influences due to Gyroscopic effects, Coriolis effects, and rotational motions of seismic base on the overall structural response are demonstrated by a numerical example. The results show that the inclusion of base rotations and Gyroscopic effects contributes significantly to the system response.

Key words : rotating machine-foundation system, Gyroscopic effect, Coriolis effect, translational and rotational motions of seismic rigid base

1. 서 론

지진하중의 작용시 원자력 발전소내에 설치된 여러가지 회전기계들이 안전하게 그 기능을 발휘해야 함은 중요한 문제이다. 이러한 회전기계-기초시스템은 회전원판과 회전축으로 이루어진 고속으로 회전하는 회전자(rotor)와 이 회전자를 지지하는 윤활유막을 내포한 베어링, 회전자-베어링시스템을 지지하는 주각(pedestal), 그리고 지반위에 건설된 기초시스

템으로 구성되어 있다. 회전자-베어링시스템에 대한 지진해석은^{(1),(2),(3)} 기계공학자들에 의해 다소 수행되었지만, 회전자-베어링-기초-지반의 상호작용을 동시에 고려한 지진해석은 해석의 난이성과 기초-지반부분은 일반적으로 토목공학자들의 연구영역이므로 학문의 연계성 부족으로 인해 수행되지 못한 실정이다. 근래에 회전기계-기초의 지진거동을 알아보기 위하여 모형실험을 통한 연구⁽⁴⁾가 수행되었지만, 지진이 작용할 때 회전기계-기초에 발생하는 여러 문제점을 일일이 실험적인 절차를 거쳐 규명하기에는 한계가 있으므로 수치해석적인 접근이

* 정회원 · 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

필요하다.

앞에서 언급한 회전자-베어링시스템은 능동장치(active mechanism)이고 기초-지반시스템은 수동장치(passive mechanism)이다. 일반적으로 수동장치의 지진해석에 있어서는 지반의 병진거동만 고려하지만 능동장치는 지반의 회전거동에 매우 민감한 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 그러므로 회전자-베어링시스템과 기초-지반시스템을 결합시킨 회전자-베어링-기초-지반시스템의 지진해석에는 지반의 병진거동과 회전거동을 모두 고려하여야 한다. 또한 회전자-베어링시스템의 동적거동을 나타내는 지배방정식의 강성행렬, 감쇠행렬 그리고 하중벡터 등은 지반의 거동치들을 포함하게 되어 해석의 난이도를 증가시킨다. 예를 들면, 지반의 회전거동과 회전자의 회전거동이 연관되어 발생하는 Coriolis효과 및 고속으로 회전하는 회전자의 회전속도와 회전자의 병진거동이 연관되어 일어나는 Gyroscope효과가 각각 시스템의 감쇠행렬 중에서 Coriolis행렬과 Gyroscope행렬을 구성하게 된다. 그래서 해석의 편의를 위해 강기반상에 놓인 회전자-베어링시스템으로 보고 해석하거나^{(1),(2),(3)} 또는 이 능동장치 부분을 질량과 회전체의 불균형 효과 만으로 간단히 대체시킨 기초-지반시스템으로 해석하거나⁽⁴⁾ 한다.

일반적으로 지반은 구조물에 비해 연약하므로 구조물을 지지하는 반력을 받아 변형하게 된다. 그러므로 회전기계의 정확한 지진해석을 위하여는 회전기계-기초-지반시스템의 상호작용을 고려한 해석을 수행해야 하지만, 지반의 영향까지 고려하는 연구는 다음 기회로 남겨두고, 본 연구에서는 고속으로 회전하는 회전자를 구성하는 회전원판(disc)과 회전축의 동적특성, 회전축과 주각(pedestal) 사이에 있는 베어링내의 윤활유막이 가지는 거동특성, 주각의 이상화 그리고 이 모두를 지지하는 기초시스템 즉, 골조기초(frame foundation)의 영향과 지진에 의한 지반의 6성분 거동(병진거동과 회전거동)을 고려하여 강기반(rigid base) 위에

건설된 회전기계-기초시스템의 지진거동을 알아 본다.

2. 운동방정식의 유도

Fig. 1과 같은 회전기계-기초시스템은 보통 회전원판(disc)과 회전축(shaft)으로 이루어진 고속으로 회전하는 회전자(rotor)와 이 회전자를 지지하는 윤활유막을 내포한 베어링, 회전자-베어링시스템을 지지하는 주각(pedestal), 그리고 골조기초(frame foundation)로 구성되어 있다. 이 그림에서 $(X_G Y_G Z_G)$ 는 강기반(rigid base)의 질량중심 G 를 원점으로 하는 공간에 고정된 직각 좌표계이다. 이때 강기반에서 X_G -축은 수평축, Y_G -축은 수직축으로 하고 Z_G -축은 회전축의 방향과 일치시킨다. 각 구성요소들의 동적특성은 요소에 따라 다르다. 다시 말하면 회전자를 구성하는 회전원판과 회전축은 그 자체가 운동하고 있는 능동장치(active mechanism)이므로 운동방정식을 유도할 때 정지하고 있는 강체나 보로 대치할 수가 없다. 여기서는 회전기계-기초시스템에 대한 동적거동을 나타내는 지배방정식을 유도하기 위하여 다음과 같은 몇 가지 요소들을 사용한다.

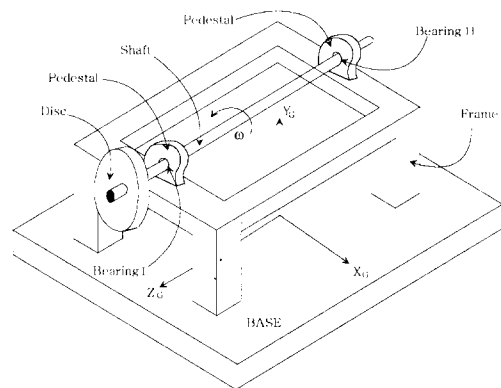


Fig. 1 Machine-foundation system

2.1 원판요소

원판의 거동을 나타내기 위하여 공간에서 회전하는 강체로 이상화하고 Euler 방법을 적용하면 다음과 같은 원판요소에 대한 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬 및 힘 벡터를 얻는다.⁽¹⁾

$$[M]_D = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[C]_D = [C_1]_D + [C_2]_D \quad (2)$$

여기서 m 은 원판의 질량이고 I_0 는 원판의 X_G -축 또는 Y_G -축에 대한 질량관성 모멘트이다. $[C_1]_D$ 는 원판요소에 대한 Gyroscope 행렬이고 $[C_2]_D$ 는 Coriolis행렬이다.

$$[C_1]_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_0\omega \\ 0 & 0 & -I_0\omega & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[C_2]_D = \begin{bmatrix} 0 & -2m\dot{\theta}_{zb} & 0 & 0 \\ -2m\dot{\theta}_{zb} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 보는 바와같이 Gyroscope 행렬은 회전자의 회전속도 ω 의 영향으로 구성되고, Coriolis행렬은 지반의 회전거동의 영향으로 유도된다. 그리고 강성행렬과 힘벡터는 식 (5)와 (6)에서 보여준다.

$$[K]_D = \begin{bmatrix} -m(\dot{\theta}_{yb}^2 + \dot{\theta}_{zb}^2) & m(\dot{\theta}_{xb}\dot{\theta}_{yb} - \ddot{\theta}_{zb}) & 0 & 0 \\ m(\dot{\theta}_{xb}\dot{\theta}_{yb} + \ddot{\theta}_{zb}) & -m(\dot{\theta}_{zb}^2 + \dot{\theta}_{xb}^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\{F\}_D = [-m\ddot{X}_b - m\dot{\theta}_{xb}\dot{\theta}_{yb} - \ddot{\theta}_{zb}), \\ -m\ddot{Y}_b - m\dot{\theta}_{zb}^2 + \dot{\theta}_{xb}^2), \\ -I_0\ddot{\theta}_{xb} - I_0\omega\dot{\theta}_{yb}, -I_0\ddot{\theta}_{yb} + I_0\dot{\theta}_{xb}]^T \quad (6)$$

위에서 (X_b, Y_b, Z_b) 는 지진에 의한 지반의 병진변위를 나타내고, $(\theta_{xb}, \theta_{yb}, \theta_{zb})$ 는 지반의 회전변위를 나타낸다.

2.2 회전축 요소

회전축 요소도 공간에서 회전하고 있기 때문에 Gyroscope영향과 Coriolis영향 그리고 지반의 회전거동을 고려하여야 하며, 또한 회전축 자체의 유연성이 포함되어야 한다. 여기서는 회전축을 Timoshenko보로 생각한 유연보 요소를 사용하며, Newton의 운동방정식과 Galerkin방법을 적용하여 회전축 요소에 대한 질량행렬

$[M]_S$, 감쇠행렬 $[C]_S$, 강성행렬 $[K]_S$ 그리고 힘 벡터 $[F]_S$ 들을 얻는다.⁽²⁾ 이때 회전축 요소에 대한 감쇠행렬, 강성행렬 및 힘 벡터도 원판요소와 마찬가지로 Gyroscope효과, Coriolis효과 그리고 지반의 회전거동과 병진거동을 포함한다. 자세한 내용은 참고문헌 (2)에 제시되어 있다.

2.3 윤활유막 베어링요소와 주각요소

회전하는 회전축은 2개의 베어링에 의해 지지되어 있는데, 이때 회전축과 베어링의 표면에서 일어나는 마찰과손을 방지하기 위해 이들 사이에 윤활유막을 설치한다. 이 윤활유막의 동역학적 특성은 회전축과 베어링 사이의 상호작용에 있어서 Fig. 2와 같은 강성계수와 감쇠계수로서 표현할 수 있다.⁽⁵⁾ 이러한 회전축을 지지하는 베어링내의 윤활막이 갖는 감쇠계수와 강성계수로 이루어지는 베어링 요소에 대한 감쇠행렬과 강성행렬 $[C]_B$ 와 $[K]_B$ 는 각각 식 (7)과 (8)로 주어진다. 또한 주각(pedestal)을 나타내기 위해서는 편이상 무한대

의 강성을 가지는 질량이 없는 강제요소를 사용한다. 이는 주각이 놓이는 골조기초로부터 회전축의 질량중심까지의 높이를 표현하기 위한 방법이다.

$$[C]_B = \begin{bmatrix} (C_{xx})_1 & (C_{yy})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (C_{yy})_1 & (C_{xx})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{xx})_2 & (C_{yy})_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{yy})_2 & (C_{xx})_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[K]_B = \begin{bmatrix} (k_{xx})_1 & (k_{yy})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (k_{yy})_1 & (k_{xx})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (k_{xx})_2 & (k_{yy})_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (k_{yy})_2 & (k_{xx})_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

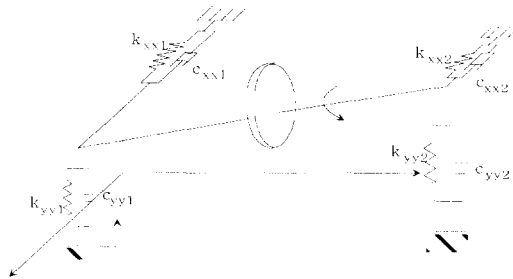


Fig. 2 Fluid-film journal bearing model



Fig. 3 Rotor-bearing system for example problem

2.4 전체시스템

기초시스템 즉, 골조기초를 나타내기 위하여 많은 문헌들에 제시되어 있는 공간 뼈대요소를 사용한다.⁽⁶⁾ 위의 요소들을 사용하여 회전 기계-기초시스템을 회전자, 윤활유막베어링 그

리고 주각을 포함한 골조기초의 부분구조계(substructures)로 나누어 회전기계-기초의 상호작용을 고려한 운동방정식을 다음과 같이 유도한다.

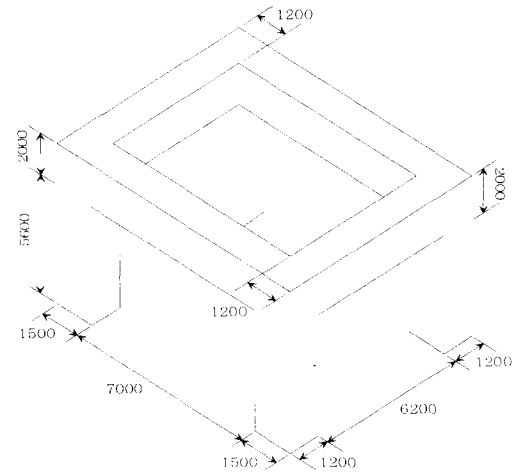


Fig. 4 Foundation system for example problem (unit : mm)

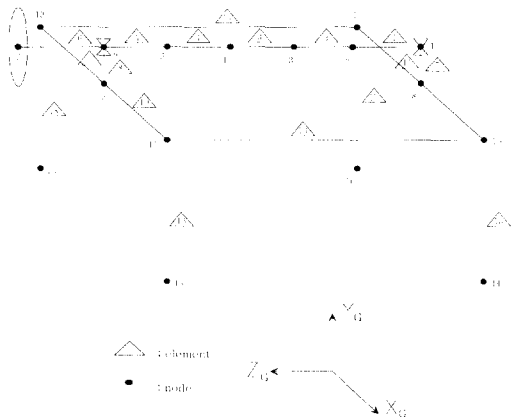


Fig. 5 Finite element discretization of the example rotating machine-foundation system

그림 1과 같은 회전기계-기초시스템을 회전자, 윤활유막베어링 그리고 골조기초의 부분구조계(substructures)로 나누며 이때 주각은 골조기초에 포함된다. 그림 5와 같이 회전기계-기초시스템을 유한요소로 분할하였을 때, 회전

자가 k 개의 절점을 가진다면 회전자에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_R \ddot{Z} + C_R \dot{Z} + K_R Z = f^e + f^b \quad (9)$$

여기서 M_R , C_R , K_R 은 각각 회전자에 대한 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이며 $(4k \times 4k)$ 행렬들이다. f^e 는 회전자의 절점하중벡터이고, f^b 는 윤활유막베어링이 회전자를 지지하는 하중벡터이다. 그리고 $(4k \times 1)$ 벡터 Z 는 회전자의 절점변위벡터이다.

다음에 골조기초를 공간 뼈대요소를 사용하여 유한요소로 분할하였을 때 n 개의 절점을 가진다면 골조기초에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_F \ddot{Y} + C_F \dot{Y} + K_F Y = g \quad (10)$$

여기서 M_F , C_F , K_F 는 각각 골조기초에 대한 $(6n \times 6n)$ 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이며 Y 는 $(6n \times 1)$ 절점변위벡터이다.

회전자에서 윤활유막베어링 I 이 위치한 절점의 X_C -축 및 Y_C -축 방향의 변위를 각각 z_h 와 z_v 라 하고, 이 두 축 방향으로 윤활유막베어링 I 이 회전자를 지지하는 힘을 각각 f_h^b 와 f_v^b 라 하자. 또한 골조기초에서 윤활유막베어링 I 이 위치한 절점의 X_C -축 및 Y_C -축 방향의 변위를 각각 y_h 와 y_v 라 하고, 이 두 축 방향으로 윤활유막베어링 I 에서 골조기초로 전달되는 힘을 각각 g_h^b 와 g_v^b 라 하면 윤활유막베어링 I 에 대한 힘의 관계식은 다음과 같다.

$$C_I (\dot{Z}_I - \dot{Y}_I) + K_I (Z_I - Y_I) = f_I^b \quad (11)$$

또한

$$f_I^b + g_I^b = 0 \quad (12)$$

위에서

$$\begin{aligned} Z_I &= [z_h \ z_v]^T, & f_I^b &= [f_h^b \ f_v^b]^T \\ Y_I &= [y_h \ y_v]^T, & g_I^b &= [g_h^b \ g_v^b]^T \end{aligned} \quad (13)$$

그리고 C_I 와 K_I 는 각각 윤활유막베어링의 감쇠계수와 강성계수들로 구성되는 (2×2) 행렬들이다. 또한 식 (9)의 f^b 와 식 (10)의 g 는 다음과 같다.

$$f^b = \begin{pmatrix} 0 \\ f_I^b \\ 0 \end{pmatrix}, \quad g = \begin{pmatrix} g_I^b \\ \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

식 (10)에서 g_I^b 를 구하고 식 (11)과 식 (12)의 관계를 고려하여 식 (9)에 대입하면 회전자의 거동에 관한 $(4k+2)$ 개의 미지수를 가지는 $(4k+2)$ 개의 식 (15)와 같은 운동방정식을 얻고, 이때의 미지 변위벡터는 식 (16)과 같다.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (15)$$

$$X = \begin{pmatrix} Z \\ Y_I \end{pmatrix} \quad (16)$$

비슷한 방법으로 골조기초의 거동에 관한 운동방정식은 식 (9)에서 f_I^b 를 구하고 식 (11)과 식 (12)를 고려하여 식 (10)에 대입하면 $(6n+2)$ 개의 미지수를 가지는 $(6n+2)$ 개의 식 (15)와 같은 형태의 운동방정식을 얻으며, 이때 미지 변위벡터는 다음 식과 같다.

$$X = \begin{pmatrix} Y \\ Z_I \end{pmatrix} \quad (17)$$

여기서 유의할 점은 회전기계-기초시스템이 가지고 있는 윤활유막베어링의 수가 h 라면 운동방정식의 미지 변위벡터에 관한 식 (16)과 식 (17)은 각각 $2h$ 만큼 요소가 늘어난다.

위의 운동방정식 (15)는 매개여기 및 비제차여기(parametric and inhomogeneous excitations)를 포함하고 있는데, 이는 좌변의 강성행렬 [K]와 감쇠행렬 [C]가 지반의 회전거동함수를 포함하고 그리고 우변의 힘 벡터 {F}가 회전거동 및 병진거동함수를 포함하고 있음을 뜻한다. 이러한 운동방정식의 해석을 위해 본 논문에서는 수치해석적 기법을 이용하여 지반거동에 대한 회전기계-기초시스템의 응답벡터(response vector)를 구한다 (부록 1 참조).

3. 지진력에 의한 지반거동

지진에 의한 지반의 병진가속도 $\ddot{X}_b(t)$, $\ddot{Y}_b(t)$ 및 $\ddot{Z}_b(t)$ 는 평균함수가 0인 定常불규칙 과정 (stationary random processes) $\ddot{X}_o(t)$, $\ddot{Y}_o(t)$ 및 $\ddot{Z}_o(t)$ 에 포락선 함수 A(t)를 각각 곱해서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\ddot{X}_b(t) &= A(t)\ddot{X}_o(t) \\ \ddot{Y}_b(t) &= A(t)\ddot{Y}_o(t) \\ \ddot{Z}_b(t) &= A(t)\ddot{Z}_o(t)\end{aligned}\quad (18)$$

여기서, 포락선 함수 A(t)는 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$A(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ (t/t_1)^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t_2 < t \end{cases}\quad (19)$$

위에서 t_1 , t_2 및 c는 지진의 형태와 작용시간에 따라 결정되는 매개변수이다. 정상 불규칙과정 $\ddot{X}_o(t)$ 는 다음과 같은 형태의 스펙트럼 밀도함수(power spectral density)로 정의된다.⁽⁸⁾

$$S_{x_o}(\omega) = \frac{[1 + 4\zeta_x^2(\frac{\omega}{\omega_x})^2]s_x^2}{[1 - (\frac{\omega}{\omega_x})^2]^2 + 4\zeta_x^2(\frac{\omega}{\omega_x})^2}\quad (20)$$

여기서, ω_x , ζ_x 및 s_x^2 은 각각 X_G -축 방

향으로 작용하는 지반가속도의 주 진동수, 등가 감쇠비 및 강도(intensity)이다. 마찬가지로 $\ddot{Y}_o(t)$ 와 $\ddot{Z}_o(t)$ 도 식 (20)과 같은 형태의 스펙트럼 밀도함수로 정의된다.

지진이 전파되는 전단파속도(shear wave velocity)를 \bar{c} 라 하면, 지반의 회전 가속도는 병진 가속도와 다음의 관계가 있다.⁽⁹⁾ 여기서는 $\bar{c} = 304.8 \text{ m/sec}$ 를 사용한다.

$$\begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_{xb}(t) \\ \ddot{\theta}_{yb}(t) \\ \ddot{\theta}_{zb}(t) \end{Bmatrix} = \frac{1}{2c} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_b(t) \\ \ddot{Y}_b(t) \\ \ddot{Z}_b(t) \end{Bmatrix}\quad (21)$$

4. 해석예제

해석예제로 사용하는 회전기계-기초시스템은 회전기계 시스템에 대해서는 Fig. 3과 같고 기초시스템에 대해서는 Fig. 4와 같다. 회전축의 회전속도 ω 는 3000 rpm이고 원판의 질량 m 과 질량관성 모멘트 I_o 는 각각 5,000 kg과 $1,267 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 이다. 또한 회전축의 탄성계수 E_s , 단위질량 ρ , 프와송 비 ν 는 각각 $20 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 7800 kg/m^3 , 0.3이다. 그리고 윤활유막 베어링의 강성계수와 감쇠계수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}k_{xx1} &= 5.89 \times 10^8 \text{ N/m}, & k_{yy1} &= 5.1 \times 10^7 \text{ N/m}, \\ k_{yx1} &= -1.29 \times 10^9 \text{ N/m}, & k_{yy1} &= 1.87 \times 10^9 \text{ N/m}, \\ k_{xx2} &= 6.7 \times 10^8 \text{ N/m}, & k_{yy2} &= 2.16 \times 10^7 \text{ N/m}, \\ k_{yx2} &= -1.49 \times 10^9 \text{ N/m}, & k_{yy2} &= 2.27 \times 10^9 \text{ N/m}, \\ C_{xx1} &= 2.8 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{sec/m}, & C_{yy1} &= -4.1 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{sec/m}, \\ C_{yx1} &= -4.1 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{sec/m}, & C_{yy1} &= 1.17 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{sec/m}, \\ C_{xx2} &= 3.1 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{sec/m}, & C_{yy2} &= -5.0 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{sec/m}, \\ C_{yx2} &= -5.0 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{sec/m}, & C_{yy2} &= 1.37 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{sec/m}\end{aligned}$$

Fig. 5는 해석예제를 사용한 회전기계-기초시스템의 유한요소분할을 나타낸다. 이 그림에

서 요소 7과 8은 주각요소들을 나타낸다.

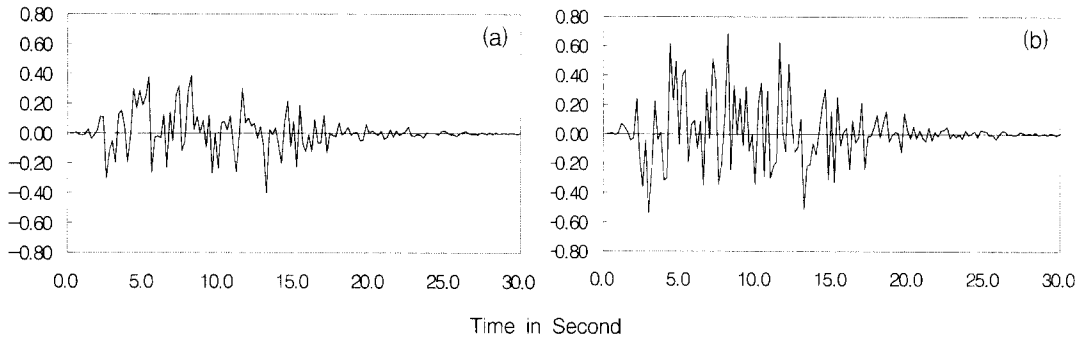
지진가속도를 시뮬레이션하기 위해 Table 1의 값을 사용하며 이는 El Centro 지진에 의한 지반가속도를 시뮬레이션하기 위한 값이다.⁽³⁾ 또한 기초시스템은 콘크리트 골조기초이다.

회전기계-기초시스템의 지진거동들에 대한 응답 중에서 Fig. 1에서 보는 왼편 베어링에서의 X_G -축 방향의 회전축과 베어링의 상대

변위와 같은 축방향으로 회전축과 베어링 사이에 작용하는 힘이 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있다. 이들 그림에서 (a)는 지반의 회전거동을 무시한 경우이고 (b)는 지반의 회전거동을 고려한 경우의 시간이력곡선들이다. 이 그림들에서 보는 바와 같이 지반의 회전거동은 회전기계-기초시스템의 응답치의 진폭을 증가시킨다.

Table 1 Parameters for the earthquake ground motions

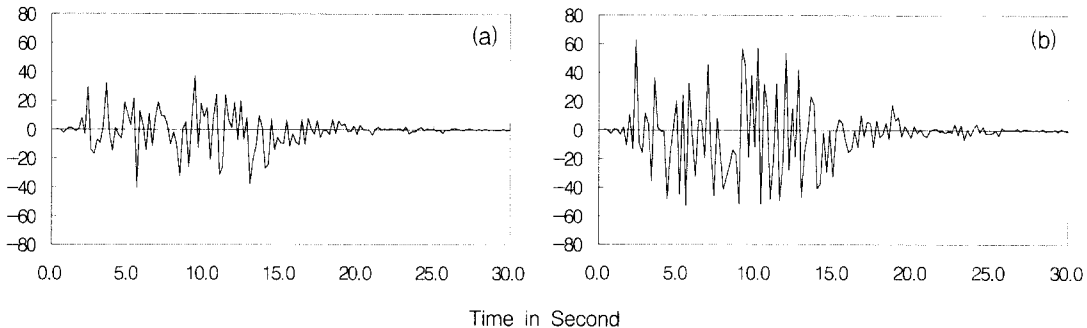
Envelope function	$t_1 = 3\text{sec}$	$t_2 = 13\text{sec}$	$c = 0.26$
Power spectral densities	$\omega_x = 18.85 \text{ rad/s}$ $\omega_y = 30.3 \text{ rad/s}$ $\omega_z = 18.85 \text{ rad/s}$	$\zeta_x = 0.65$ $\zeta_y = 0.65$ $\zeta_z = 0.65$	$s_x^2 = 1.35 \times 10^{-2} m^{2/l} \text{ sec}^3$ $s_y^2 = 3.70 \times 10^{-3} m^{2/l} \text{ sec}^3$ $s_z^2 = 1.00 \times 10^{-2} m^{2/l} \text{ sec}^3$



(a) excluding base rotations

(b) including base rotations

Fig. 6 Sample functions of rotor-bearing relative displacement along X_G -direction in bearing I (mm)



(a) excluding base rotations

(b) including base rotations

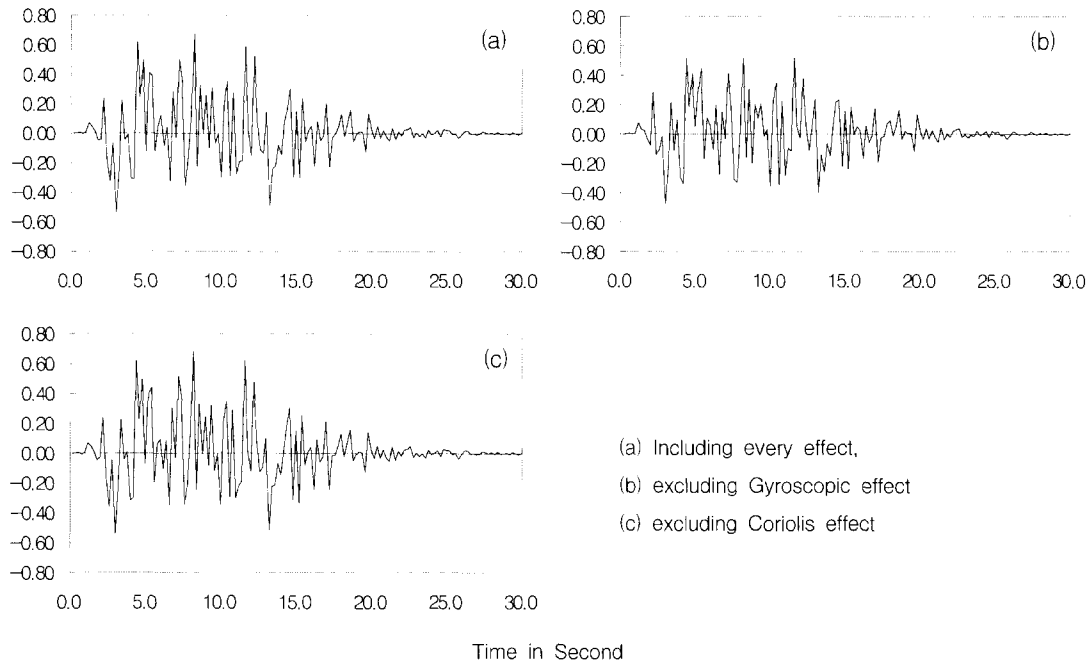


Fig. 8 Sample functions of rotor-bearing relative displacement along X_G -direction in bearing I (mm)

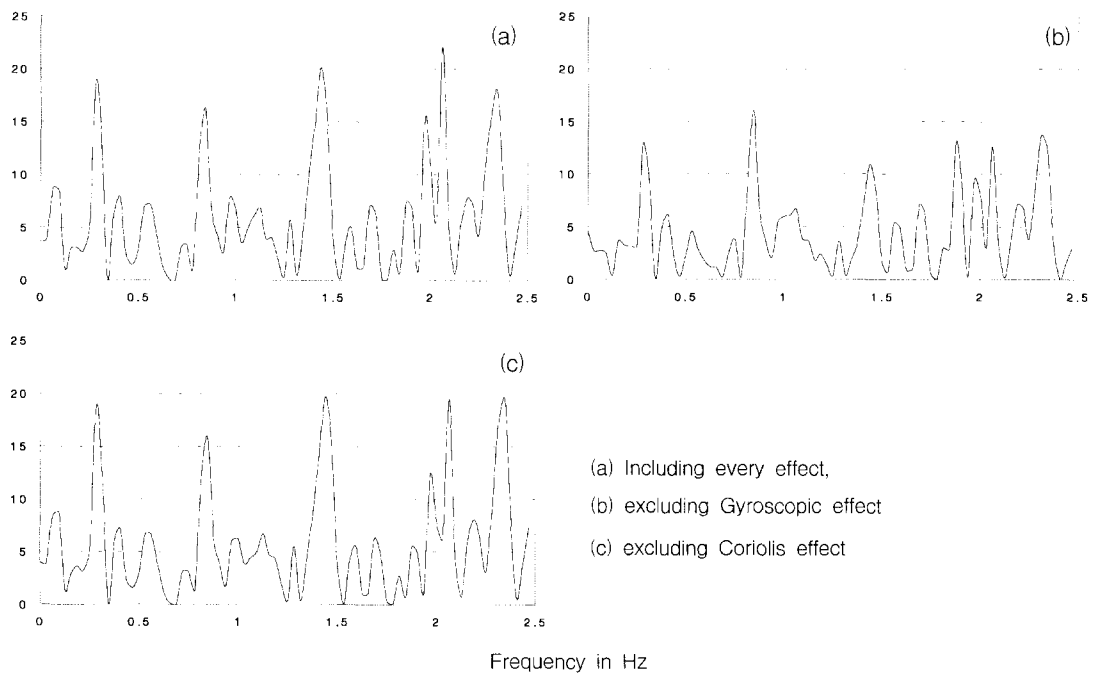


Fig. 9 Power spectrum of rotor displacement along X_G -direction in bearing I (mm^2/sec)

Fig. 8은 Fig. 1에서 보는 왼편 베어링(베어링 I)에서의 X_G -축 방향의 회전축과 베어링의 상대변위에 대해 Gyroscope효과와 Coriolis효과를 포함한 경우와 각각의 효과를 포함하지 않은 경우의 결과를 보여준다. 이 그림에서 (a)는 Gyroscope효과와 Coriolis효과를 모두 고려하여 전체 시스템에 대한 감쇠행렬을 구성하여 얻은 결과이고 (b)는 Gyroscope효과를 무시한 경우의 결과이며 (c)는 Coriolis효과를 무시한 경우 얻은 결과이다. Fig. 9는 이들 응답의 power spectrum을 나타낸다. 또한 Fig. 10은 같은 축방향으로 회전축과 베어링 사이에 작용하는 힘을 나타내며, Fig. 11은 이 응답의 power spectrum이다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 회전기계-기초시스템에 대한 감쇠행렬을 구성할 때 Gyroscope효과는 고려하여야 하

지만 Coriolis효과는 무시하여도 시스템의 응답에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12는 회전기계-기초시스템과 회전자-베어링 시스템으로 각각 모델링한 경우의 응답의 비교이다. 이 그림에서 (a)는 회전기계-기초시스템으로 모델링하여 구한 응답이고, (b)는 회전자-베어링 시스템으로 모델링한 경우의 응답이다. 예측한 바와 같이 회전자-베어링 시스템으로 모델링한 경우의 응답이 다소 크게 나타난다. 이는 지반 거동이 회전자-베어링 시스템에 직접 작용하는 것으로 이상화하였기 때문이다. 회전기계의 내진설계시 회전자-베어링 시스템으로 이상화하면 안전측의 설계가 되겠지만, 기초의 거동은 알아볼 수 없기 때문에 회전기계-기초 시스템으로 지진해석을 수행하여야 함이 타당하다.

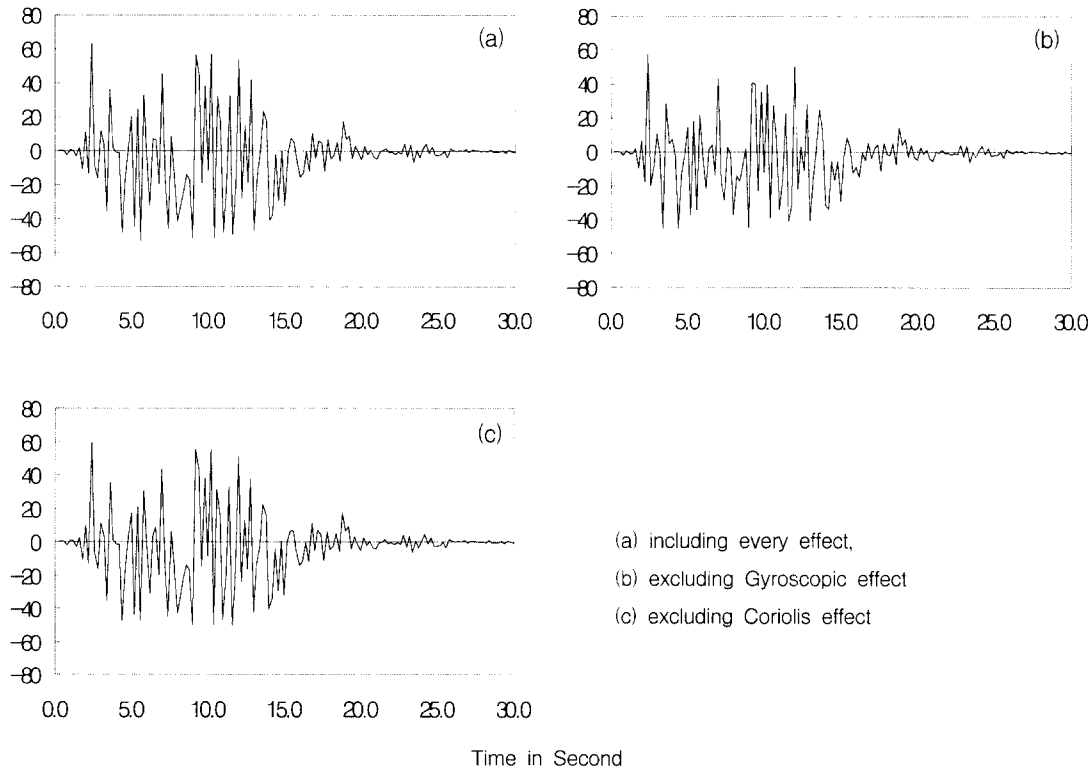


Fig. 10 Sample functions of rotor-bearing reaction force along X_G -direction in bearing I (kN)

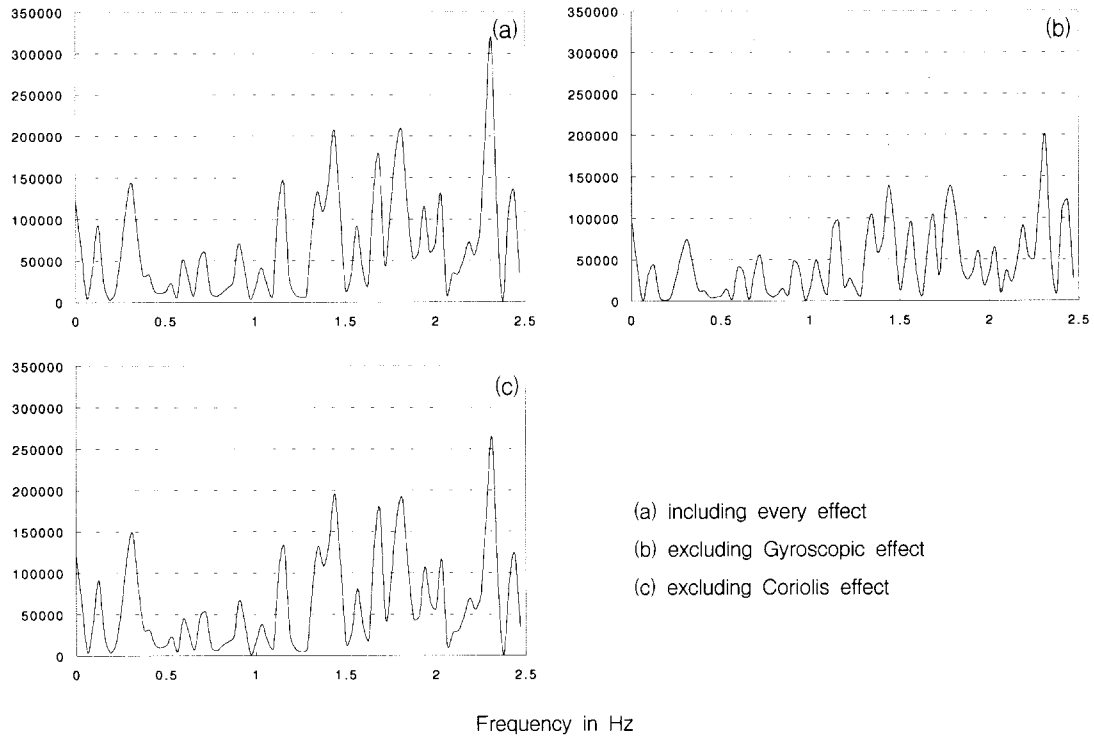


Fig. 11 Power spectrum of rotor-bearing reaction force along X_G -direction in bearing I (kN^2/sec)

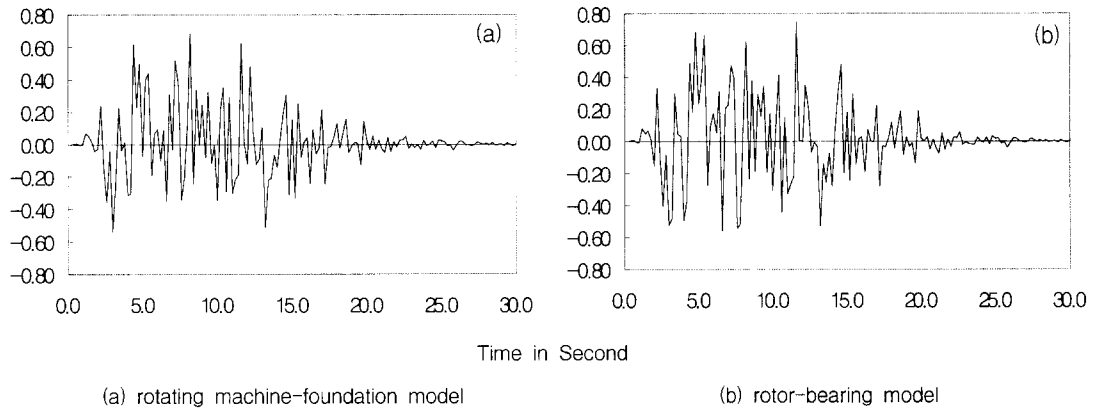


Fig. 12 Sample functions of rotor-bearing relative displacement along X_G -direction in bearing I (mm)

5. 결 론

회전기계-기초시스템의 지진거동을 나타내는 운동방정식 (15)를 유도할 때 식 (2)-(8)로

주어지는 Gyroscope효과, Coriolis효과, 지반의 회전거동 그리고 병진거동을 모두 고려하였다. 해석예제에서 보는 바와 같이 지반의 회전거동은 회전기계-기초시스템의 응답치의 진폭을

증가시킨다. 또한 Gyroscope효과는 고려하여야 하지만 Coriolis효과는 무시하여도 시스템의 응답에 큰 영향을 미치지않음을 알 수 있었다. 다시 말하면 회전기계-기초시스템의 지진해석에 있어서 지반의 회전거동을 포함하는 여섯성분의 지반거동을 모두 고려하여야하며, 회전축의 회전속도의 영향으로 유도되는 Gyroscope효과를 감쇠행렬을 구성할 때 필히 고려하여야 한다.

회전기계-기초시스템과 회전자-베어링시스템으로 각각 모델링한 경우의 응답의 비교에서는 예측한 바와 같이 회전자-베어링시스템으로 모델링한 경우의 응답이 다소 크게 나타난다. 이는 회전자-베어링시스템이 지반거동을 받는 강기반상에 놓인 것으로 이상화하였기 때문이다. 그러나 회전기계의 내진설계시 회전자-베어링시스템으로 이상화하면 안전축의 설계가 되겠지만, 기초의 거동은 알아볼 수 없기 때문에 회전기계-기초 시스템으로 지진해석을 수행해야 함이 타당하다.

본 연구에서는 회전축의 불균형 질량 (unbalanced mass)분포에 대한 영향이나 구조물-지반의 상호작용(soil-structure interaction)의 영향은 고려하지 않았다. 앞으로 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각한다.

감사의 글

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Soni, A.H. and Srinivasan,V., "Seismic analysis of a gyroscopic mechanical system," *J. Vib. Acoustics, Stress and Reliability Design, Trans.*, ASME, Vol. 105, 1983, pp. 449-455.
2. Soni, A.H. and Srinivasan, V., "Seismic analysis of a rotor-bearing system," *J. Earthquake Eng. and Structural Dynamics*,

1984, 12, pp. 287-311.

3. Samali, B., Kim, K.B., and Yang, J.N., "Random vibration of rotating machines under earthquake excitations," *J. Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 112, No. 6, 1986, pp. 550-565.
4. 이종림, "진동저감시스템을 갖춘 회전기계 기초의 지진하중에 대한 동적해석", 1995, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사학위 논문.
5. Lund, J. W., "Evaluation of stiffness and damping coefficients for fluid-film bearings," *Shock and Vibration Digest*, Vol.11, No.1, 1979, pp. 5-10.
6. Weaver, Jr. W. and Johnston, P.R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
7. Yang, J.N., "Simulation of random envelope processes," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.21, No.1, 1973, pp. 73-85.
8. Liu, S.C., "Evolutionary power spectral density of strong motion earthquake," *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 60, No. 3, 1970, pp. 891-900.
9. Newmark, N.M., "Torsion in symmetrical building," *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, Vol. 2, No. A.3, 1969, pp. 19-32.

부 록

1. 수치해석적 기법

앞에서 유도한 운동방정식 (15)는 매개여기 및 비제차여기(parametric and inhomogeneous excitations)를 포함하고 있는데, 이는 좌변의 강성행렬 $[K]$ 와 감쇠행렬 $[C]$ 가 지반의 회전 거동함수를 포함하고 그리고 우변의 힘 벡터

$\{F\}$ 가 회전거동 및 병진거동함수를 포함하고 있음을 뜻한다. 이러한 운동방정식의 해법에는 구조진동 분야에서 널리 사용되는 진동수영역 해법을 적용할 수가 없다.

본 논문에는 다음과 같은 수치해석적 기법을 사용하여 지반거동에 대한 회전기계-기초 시스템의 응답을 구하려 한다.

(1) 세 성분의 지반 병진 가속도 시간이력함수 (time history sample functions)를 각각의

스펙트럼 밀도함수(power spectral density) 및, 포락선함수를 사용하여 시뮬레이션한다.

(2) 세 성분의 지반회전가속도 시간이력함수를 식 (21)로부터 시뮬레이션한다.

(3) 1단계와 2단계에서 얻은 여섯 성분의 지반 가속도 시간이력함수를 입력데이터로 하여, 응답의 시간이력함수를 운동방정식 (15)에 Newmark의 직접 적분법을 적용하여 얻는다.