

유체-구조물 상호작용을 고려한 면진구조물의 추계학적 응답해석

Stochastic Analysis of Base-Isolated Pool Structure Considering Fluid-Structure Interaction Effects

고현무* · 김재관** · 박관순*** · 하동호****

Koh, Hyun Moo · Kim, Jae Kwan · Park, Kwan Soon · Ha, Dong Ho

Abstract

A method of stochastic response analysis of base-isolated fluid-filled pool structures subject to random ground excitations is studied. Fluid-structure interaction effects between the flexible walls and contained fluid are taken into account in the form of added mass matrix derived by FEM modeling of the contained fluid motion. The stationary ground excitation is represented by Modified Clough-Penzien spectral model and the nonstationary one is obtained by imposing an envelope function on the stationary one. The stationary and nonstationary response statistics of the two different isolation systems are obtained by solving the governing Lyapunov covariance matrix differential equations.

요 지

Random 지반운동에 대한 면진구조물 응답의 추계학적 해석방법을 연구하였다. 유연한 벽체와 내부유체간의 유체구조물 상호작용은 유체운동의 유한요소 모델링에 의하여 얻어지는 부가질량행렬 형태로 고려되었다. 定常(Stationary)지반운동으로는 수정된Clough-Penzien Spectral Model이 사용되었으며, 非定常(Nonstationary)지반운동으로는 상기모델에 포락함수를 적용한 모델을 사용하였다. 운동을 지배하는 Lyapunov Covariance Matrix 미분방정식의 해를 구하여 두 종류 면진시스템의 정상응답 및 비정상응답을 해석하였다.

1. 서 론

유체-구조물 상호작용에 의하여 유연한 측벽에 작용하는 동수압과 수조구조물의 응답은 크게 증가

될 수 있으나, 면진장치(Base-Isolation System)는 구조물에 전달되는 지반운동을 조절하여 그에 의한 응답을 효과적으로 감소시킬 수 있다. Housner⁽¹⁾는 수평지진하중에 의한 유체저장조내에서의 유동의 영향을 자유표면의 운동에 포함되어 진동하는 유체 성분, 즉 대류(Convective)성분과 지진에 의한 벽면의 수평운동과 함께 움직이는 유체성분, 즉 충격(Impulsive)성분으로 구분하였다. 이때 대류성분에 의한

* 정회원 · 서울대학교 토목공학과 부교수
** 정회원 · 서울대학교 토목공학과 조교수
*** 정회원 · 서울대학교 토목공학과 박사과정
**** 서울대학교 토목공학과 공학석사

동압력은 충격성분에 의한 동압력과 비연계시킬 수 있고 그 값은 상대적으로 작다는 사실은 잘 알려져 있다.

본 연구에서는 충격성분의 압력을 이상유체에 대한 포텐셜 흐름의 유한요소모델링에 의해 구한 후, 그 압력을 절점력으로 환산하는 과정을 거쳐 구조물에 부가될 질량을 도출하여, 구조물의 운동방정식과 연계시켰다. 연계된 시스템에서는 첫번째 모드가 지배적이라는 사실을 고려하여,⁽²⁾ 유체-구조물 시스템의 거동을 연계계의 첫번째 모드로 표현하였다. 면진장치가 있는 구조물의 경우 첫번째 모드는 더욱 지배적인 것으로 나타났다. 면진장치별 응답 특성을 비교하기 위해서 LRB(Laminated Rubber Bearing) 시스템과 R-FBI(Resilient-Friction Base Isolation) 시스템에 대해 해석을 수행하였다. R-FBI 시스템은 마찰판에 의해 효과적인 에너지 흡수, 분산이 이루어지며, 그에 따라 LRB에 비해 상대변위를 크게 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다.

입력 지반가속도의 PSD(Power Spectral Density) 함수로는 Clough-Penzien Spectral Model^(3,4)을 사용하였으며, 추계학적 미분방정식(Stochastic Differential Equation)^(4,5,6)을 이용하여 定常응답(Stationary Response)과 非定常응답(Nonstationary Response)을 구하였다. 유효진동수(Effective Frequency)에 따른 구조물상단의 가속도응답과 면진장치의 변위응답을 유체유무와 면진유무별로 비교분석하였고, 또한 면진시스템별로 응답특성을 비교하였다.

2. 입력지반운동 모델링

지진에 의한 지반가속도 시간이력은 강진지속구간에서는 Stationary Random Process와 유사한 경향을 갖고 있기 때문에 구조물응답의 추계학적해석 시 지반운동을 Stationary Process로 모델링하는 방법이 널리 사용되어 왔다.^(3,7) 그 중 가장 간단한 방법은 지반가속도를 White Noise로 모델링하는 것이다. 그러나 실제 지반가속도의 Power Spectrum은 주파수에 따라서 변화하고 유한한 Band Limit를 갖는다. 따라서, 적절한 Low-Pass Filter를 사용하여 White Noise의 PSD 함수를 수정한 Kanai-Tajimi 모델이(이하 K-T 모델)제시되었고, 이를 실제 지진기록의 PSD함수와 비교하여 나타나는 저

주파수 영역의 차이를 High-Pass Filter를 사용하여 수정한 PSD함수가 Clough와 Penzien⁽³⁾에 의하여 제안되었으며, 이를 Clough-Penzien Spectral Model(이하 C-P모델)이라 한다. 면진구조물의 경우에는 그 응답에 지배적인 고유진동수가 저진동수 영역에 속하기 때문에, 추계학적 해석시 저주파수 영역에서 실제 지반가속도의 PSD 내용을 잘 표현할 수 있는 C-P 모델이 K-T 모델에 비하여 우수하다고 판단된다. C-P 모델의 PSD 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_g(\omega) = S_0 \left[\frac{1 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right\}^2 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \right] \times \left[\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^4}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2\right\}^2 + 4\xi_c^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2} \right] \quad (1)$$

여기서 S_0 는 White Noise의 Spectral Density 상수이고, ω_g , ξ_g , ω_c , ξ_c 는 Filter Parameter들이다.

현재 국내원자력분야에서는 US NRC Reg. Guide 1.60⁽⁸⁾에 있는 부지특성에 무관한 설계 응답스펙트럼을 규정된 설계지반가속도에 따라 Scaling하여 내진설계를 위한 입력 지반운동으로 사용하고 있다. 따라서 식 (1)에 의하여 주어진 PSD함수를 원자력 관련시설의 내진설계를 위한 입력운동으로 사용하기 위해서는 Filtering된 White Noise의 응답스펙트럼이 US NRC Reg. Guide 1.60⁽⁸⁾에 규정된 설계응답스펙트럼을 포괄할 수 있도록 Spectral Density 상수 S_0 와 Filter Parameter들을 결정하여야 할 필요가 있다.^(9,10)

그러나 상기방법에는 진원메카니즘의 특성이 반영될 수 없는 단점이 있으므로 본 연구에서는 참고문헌^(4,11)에서 제안된 바와 같이 식 (1)에 주어진 PSD함수에 Low Pass Filter를 추가한 수정된 C-P 모델을 입력지반운동 표현에 사용하였다. 그런데 이 수정C-P 모델의 Filter Parameter들은 진원메카니즘모델의 일종인 Specific Barrier Model⁽¹¹⁾에 의하여 결정되기 때문에 진원특성이 반영될 수 있는 장점을 갖고있다. 이 수정된 C-P 모델의 PSD함수는 다음과 같다.

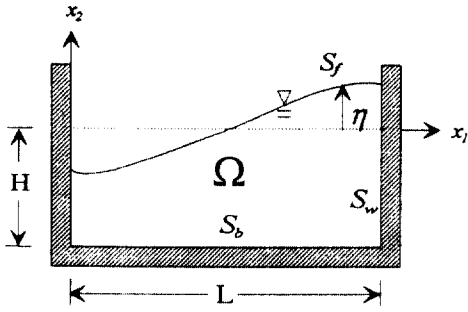


그림 1. 유체의 영역과 경계.

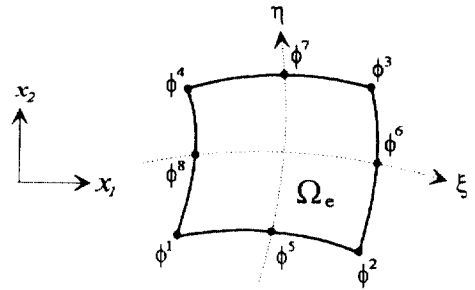


그림 2. 요소의 영역과 경계 및 절점포텐셜(8 절점 평면요소의 경우).

$$\begin{aligned} \phi_g(\omega) = & S_0 \left[\frac{1 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right\}^2 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \right] \\ & \times \left[\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^4}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2\right\}^2 + 4\xi_c^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2} \right] \\ & \times \left[\frac{1}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2\right\}^2 + 4\xi_m^2 \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 S_0 는 White Noise의 Spectral Density 상수 이고, $\omega_g, \xi_g, \omega_c, \xi_c, \omega_m, \xi_m$ 는 Filter Parameter들이다.

3. 유체-구조물 상호작용 모델링

본절에서는 유연한 벽체와 내부유체간의 상호작용 즉, 유체-구조물 상호작용을 모델링하기 위하여 본 연구에서 사용된 부가질량행렬법을 설명한다. 이 부가질량행렬법은 유체운동의 유한요소모델링에 의하여 산출될 수 있다. 비점성, 비압축성의 이상유체의 비회전흐름은 속도포텐셜로 나타낼 수 있으며,⁽¹²⁾ 속도포텐셜 $\phi(z, t)$ 는 유체의 각 경계와 영역(그림 1)에서 다음의 방정식을 만족한다.

$$\dot{u}_i = \frac{\partial \phi}{\partial z_i} \quad (3)$$

$$\nabla^2 \phi = \left(\frac{\partial^2}{\partial z_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_2^2} \right) \phi(z, t) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad \text{on } S_f \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \eta \quad \text{on } S_f \quad (7)$$

여기서, $z = (z_1, z_2)$ 는 관성좌표계에서의 위치벡터, $\dot{u}_i = \dot{u}_i(z)$ 는 관성좌표계에서의 유체속도벡터의 i 축방향 성분, $p = p(z)$ 는 유체의 압력, $\eta = \eta(z, t)$ 는 자유수면의 높이변화, $n = n(z)$ 는 경계에서의 외향법선벡터를 각각 의미하며, ρ 는 유체의 질량, g 는 중력가속도, Ω 는 유체의 영역, S_f 는 자유수면을 각각 나타낸다.

유체운동의 유한요소모델링시 각요소내에서의 속도포텐셜을 다음과 같이 절점의 속도포텐셜 ϕ_e 로 나타낼 수 있다.

$$\phi = \sum_{j=1}^8 N^j \phi_e^j \quad (8)$$

여기서, N^i 는 8절점 Isoparametric 요소의 형상함수이다.

식 (4)에 Galerkin 방법을 적용하고 Vector Identity와 식 (8)을 이용하면, 형상함수별 가중잔류치 R_i 는 다음과 같이 구해진다.⁽¹²⁾

$$\begin{aligned} R_i &= \int_{\Omega_e} N^i \nabla^2 \phi dV = \int_{\Omega_e} (-\nabla N^i \nabla \phi) dV + \int_{\Omega_e} \nabla(N^i \nabla \phi) dV \\ &= - \sum_{j=1}^8 \phi_e^j \int_{\Omega_e} (N^i_{,k} N^j_{,k}) dV + \sum_{j=1}^4 \int_{S_e^j} N^i q dS = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

여기서, $q = \nabla \phi \cdot n = \phi_{,n}$ 이고 Ω_e 는 요소의 영역, S_e^j 는

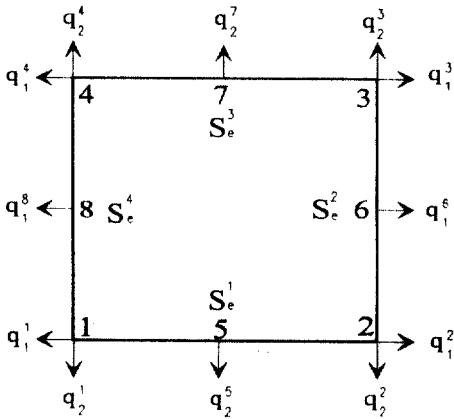


그림 3. 절점의 항속도벡터의 정의.

요소의 경계(그림 2)를 나타낸다.

경계에서의 법선방향속도 q 를 그림 3에 정의된 바와 같은 절점에서의 법선방향속도 q_i^j 로부터 동일한 형상함수를 사용하여 내삽한다면, 식 (9)는 다음과 같이 변환된다.

$$[A_e]\{\phi_e\} = [H_e]\{q_e\} \quad (10)$$

$(n_e \times n_e)(n_e \times 1) \quad (n_e \times (n_e + 4))(n_e + 4) \times 1$

여기서 n_e 는 요소의 절점수이다.

그림 1에서 영역의 분할된 각 요소별로 식 (10)과 같은 방정식을 구한 후 직접강성도법에서와 같은 조합에 의하여 전체유체영역 Ω 의 운동지배방정식이 다음과 같은 형태로 도출된다.

$$\begin{bmatrix} A_{BB} & A_{BI} \\ A_{IB} & A_{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_B \\ \phi_I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{BB} & 0 \\ H_{IB} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_B \\ q_I \end{Bmatrix} \quad (11)$$

여기서 하첨자 B는 경계에 위치한 절점에서, 하첨자 I는 내부절점에서 정의된다는 것을 각각 의미한다. 그러나 ϕ_B 와 q_B , ϕ_I 와 q_I 의 차원은 동일하지 않다. Static Condensation을 적용하면 식 (11)로부터 경계상의 절점 포텐셜벡터와 절점속도벡터와의 관계식이 구하여지고 다시 시간에 대하여 미분한 후 조건식 (3), (6), (7)을 대입하면 경계상의 절점압력 벡터와 절점가속도벡터와의 관계식이 도출된다. 서론에서 언급한 바와 같이 유체의 자유수면에서 Sloshing 영향을 고려하지 않는 Impulsive 경계조건 식 (12)를 적용하고

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad \text{on } S_f \quad (12)$$

수평방향 지반운동만을 고려할 시에는 그림 1에서 S_w , 즉 벽체와의 접촉경계상에 놓인 절점에서 정의되는 압력벡터와 절점가속도벡터와의 관계식이 유도된다. 접촉경계에 분포된 압력에 가상일의 원리를 적용하여 절점력벡터로 변환하면 다음과 같은 형태의 절점가속도벡터와 절점력벡터와의 관계식이 구하여진다.

$$[M^*]\{\ddot{u}\} = -\{F^*\} \quad (13)$$

여기서 $\{\ddot{u}\}$ 는 관성좌표계에서의 수평방향 절점가속도벡터, $\{F^*\}$ 는 구조물에 작용하는 절점력벡터이고 $[M^*]$ 는 부가질량행렬이다. 두 측벽이 동일하다면 Condensation에 의하여 한쪽측벽에서의 절점가속도와 절점력벡터와의 관계식이 식 (14)와 같은 형태로 도출된다.

$$[M^*]\{\ddot{u}\} = -\{F^*\} \quad (14)$$

$$[M^*] = \frac{1}{2}[M_{11}^* + M_{12}^* + M_{21}^* + M_{22}^*] \quad (15)$$

여기서 $\{F^*\}$, $\{\ddot{u}\}$ 와 $[M^*]$ 은 각각 한쪽측면에 작용하는 절점력벡터와 절점가속도벡터, 부가질량행렬이며, 식 (15)에서 M_{ij}^* 는 $[M^*]$ 의 부분행렬이다. 식 (13) 또는 (14)의 부가질량행렬을 구조물운동방정식의 질량행렬에 적절히 더함으로써 유체-구조물 상호작용의 영향이 고려될 수 있다. 단, 대칭구조물의 경우에는 식 (14)의 부가질량행렬을 사용하는 것이 더 편리하다.

4. 면진수조구조물 응답해석모델링

본절에서는 대칭 면진수조구조물에서의 구조물과 유체와의 연계방법과 전체시스템의 해석모델을 기술한다. 대칭수조의 경우에는 그 절반만 모델링할 필요가 있다. 따라서 빈수조의 거동은 그림 4에서와 같은 집중변수모델에 의하여 해석될 수 있다.

상부구조, 즉 바닥슬랩 위의 측벽의 모델에서 회전관성의 영향이 경미하다면 그 지배방정식은 수평방향의 자유도만으로 표현되는 방정식으로 Condensation될 수 있다.

$$\begin{aligned} [M^*]\{\ddot{x}\} + [C^*]\{\dot{x}\} + [K^*]\{x\} \\ = -[M^*]\{1\}(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) + \{f^*\} \end{aligned} \quad (16)$$

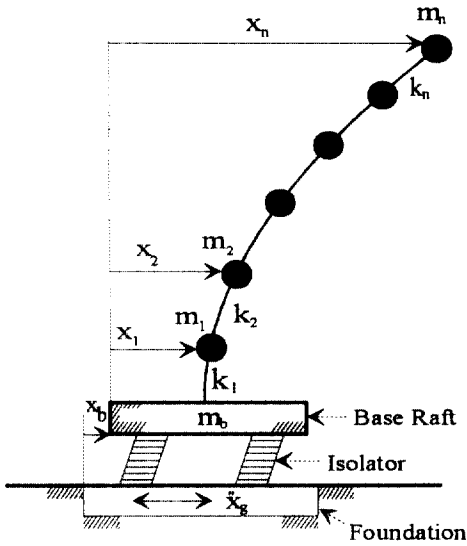


그림 4. 집중변수모델.

여기서 $\{1\} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$, $\{f^w\}$ 는 절점에 작용하는 외력 벡터이다.

식 (14)에서 바닥슬랩에 위치한 절점의 자유도를 분리하면 부가질량행렬과 절점가속도 및 절점력 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$[M^w] = \begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{1n} & m_{1b} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ m_{n1} & \dots & m_{nn} & m_{nb} \\ m_{b1} & \dots & m_{bn} & m_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ww}^1 & M_{wb}^1 \\ M_{bw}^1 & M_{bb}^1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\{f\} = \begin{pmatrix} \{f_w^1\} \\ f_b^1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\{\ddot{u}\} = \begin{pmatrix} \{\ddot{x}\} + \{1\}(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) \\ \ddot{x}_b + \ddot{x}_g \end{pmatrix} \quad (19)$$

식 (17), (18), (19)를 다시 식 (14)에 대입하면

$$[M_{ww}^1]\{\ddot{x}\} + ([M_{ww}^1]\{1\} + \{M_{wb}^1\})(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = -\{f_w^1\} \quad (20)$$

$$[M_{bw}^1]\{\ddot{x}\} + ([M_{bw}^1]\{1\} + M_{bb}^1)(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = -f_b^1 \quad (21)$$

여기서 $[\]$ 는 행벡터를, $\{ \}$ 는 열벡터를 의미한다.

식 (20)의 $\{f_w^1\}$ 를 식 (16)의 $\{f^w\}$ 에 대치하면 상부구조의 운동지배방정식이 구하여진다.

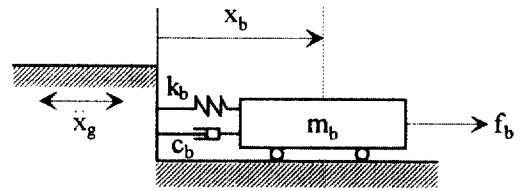


그림 5. 하부구조의 역학적 모델.

$$[M^w + M_{ww}^1]\{\ddot{x}\} + [C^w]\{\dot{x}\} + [K^w]\{x\} = -([M^w + M_{ww}^1]\{1\} + \{M_{wb}^1\})(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) \quad (22)$$

면진장치와 바닥슬랩으로 구성되는 하부구조는 역학적으로 그림 5와 같이 모델링될 수 있다. 여기서 f_b 는 상부구조에서 전달되는 관성력 f_b^1 과 바닥슬랩에 위치한 슬랩에 직접 작용하는 절점력인 식 (21)에서의 f_b^1 와의 합으로 표현된다.

식 (22)로부터 상부구조에서 하부구조로 전달되는 관성력의 합 f_b 는 다음과 같이 구하여진다.

$$f_b^s = -\{1\}^T [M^w + M_{ww}^1]\{\ddot{x}\} - \{1\}^T ([M^w + M_{ww}^1]\{1\} + \{M_{wb}^1\})(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) \quad (23)$$

식 (21)의 f_b^1 와 식 (23)의 f_b 로부터 그림 5에 묘사된 하부구조의 운동방정식은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$(m_b + [M_{bw}^1]\{1\} + M_{bb}^1 + \{1\}^T([M^w + M_{ww}^1]\{1\} + \{M_{wb}^1\}))\ddot{x}_b + c_b\dot{x}_b + k_b x_b + (\{1\}^T [M^w + M_{ww}^1] + [M_{bw}^1])\{\ddot{x}\} = -(m_b + [M_{bw}^1]\{1\} + M_{bb}^1 + \{1\}^T([M^w + M_{ww}^1]\{1\} + \{M_{wb}^1\}))\ddot{x}_g \quad (24)$$

면진구조물의 운동은 식 (22), (24)에 의하여 표현될 수 있으며 재정리하면 다음과 같다.

$$[M_s]\{\ddot{x}\} + [C_s]\{\dot{x}\} + [K_s]\{x\} + \{Q_s\}\ddot{x}_b = -\{Q_s\}\ddot{x}_g \quad (25)$$

$$M_b\ddot{x}_b + c_b\dot{x}_b + k_b x_b + \{Q_b\}\{\ddot{x}\} = -M_b\ddot{x}_g \quad (26)$$

여기서,

$$[M_s] = [M^w + M_{ww}^1]$$

$$[C_s] = [C^w]$$

$$[K_s] = [K^w]$$

$$\{Q_s\} = [M^w + M_{ww}^1]\{1\} + \{M_{wb}^1\}$$

$$M_b = m_b + M_{bb}^1 + [M_{bw}^1]\{1\}$$

$$+ \{1\}^T([M^w + M_{ww}^1]\{1\} + \{M_{wb}^1\})$$

$$[Q_b] = \{1\}^T [M^w + M_{ww}^1] + [M_{bw}^1]$$

상부구조의 운동이 식 (25)의 무감쇠 시스템의 제 1차 고유모드에 의하여 근사될 수 있다고 가정하면, 상대변위벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\{x\} = \{\phi_1\}y \quad (27)$$

여기서 $\{\phi_1\}$ 는 제 1차 고유모드벡터이고 $y=y(t)$, 즉, 모드좌표이다.

식 (27)을 사용하면 식 (25)와 식 (26)은 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$\ddot{y} + 2\xi_1\omega_1\dot{y} + \omega_1^2y = -d_1(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) \quad (28)$$

$$\ddot{x}_b + 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b + \omega_b^2x_b + d_b\ddot{y} = -\ddot{x}_g \quad (29)$$

여기서,

$$\omega_1^2 = \frac{\{\phi_1\}^T[M_s]\{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T[M_s]\{\phi_1\}}$$

$$d_1 = \frac{\{\phi_1\}^T[Q_s]}{\{\phi_1\}^T[M_s]\{\phi_1\}}$$

ξ_1 = 제 1차 고유 모드감쇠비

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{M_b}$$

$$d_b = \frac{[Q_b]\{\phi_1\}}{M_b}$$

ξ_b = 면진장치의 감쇠비

5. 추계학적 응답해석

지반가속도를 제 2절에서 기술한 바와 같이 Filtering된 White Noise로 정의하면 Markov Vector

Process 방법에 의하여 식 (28)과 식 (29)로 표현되는 LRB Type 면진구조조물의 추계학적 응답이 해석된다. 식 (2)에 주어진 수정된 C-P 모델의 PSD 함수는 PSD 상수 S_0 인 White Noise $\ddot{x}_w(t)$ 가 다음에 주어진 4종의 Linear Filter에 의하여 순차적으로 Filtering된 응답인 \ddot{x}_g 의 PSD 함수임을 알 수 있다.⁽⁴⁾

$$\ddot{x}_g = -2\xi_g\omega_g\dot{x}_A - \omega_g^2x_A \quad (30)$$

$$\ddot{x}_A = -2\xi_g\omega_g\dot{x}_S - \omega_g^2x_A - \ddot{x}_S \quad (31)$$

$$\ddot{x}_S = -2\xi_c\omega_c\dot{x}_S - \omega_c^2x_S - \omega_m^2x_F \quad (32)$$

$$\ddot{x}_F = -2\xi_m\omega_m\dot{x}_F - \omega_m^2x_F - \ddot{x}_w \quad (33)$$

식 (28), (29), (30)으로부터 다음 두 식이 구하여진다.

$$\ddot{y} = -2\xi_1\omega_1\alpha\dot{y} - \omega_1^2\alpha y + 2\xi_b\omega_b d_1\alpha\dot{x}_b + \omega_b^2 d_1\alpha x_b \quad (34)$$

$$\ddot{x}_b = 2\xi_1\omega_1 d_b\alpha\dot{y} + \omega_1^2 d_b\alpha y - 2\xi_b\omega_b\alpha\dot{x}_b - \omega_b^2\alpha x_b + 2\xi_g\omega_g\dot{x}_A + \omega_g^2x_A \quad (35)$$

여기서 $\alpha = \frac{1}{(1-d_1d_b)}$ 이다.

식 (31), (32), (33), (34), (35)는 연립일차미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\{y\} = [P]\{Y\} + \{F\} \quad (36)$$

여기서,

$$\{Y\} = \{y, \dot{y}, x_b, \dot{x}_b, x_A, \dot{x}_A, x_S, \dot{x}_S, x_F, \dot{x}_F\} \quad (37a)$$

$$\{F\} = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -\ddot{x}_w\} \quad (37b)$$

$$[P] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_1^2\alpha & -2\xi_1\omega_1\alpha & \omega_b^2 d_1\alpha & 2\xi_b\omega_b d_1\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_1^2 d_b\alpha & 2\xi_1\omega_1 d_b\alpha & -\omega_b^2\alpha & -2\xi_b\omega_b\alpha & \omega_g^2 & 2\xi_g\omega_g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_g^2 & -2\xi_g\omega_g & \omega_c^2 & 2\xi_c\omega_c & \omega_m^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_c^2 & -2\xi_c\omega_c & -\omega_m^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_m^2 & -2\xi_m\omega_m \end{bmatrix} \quad (37c)$$

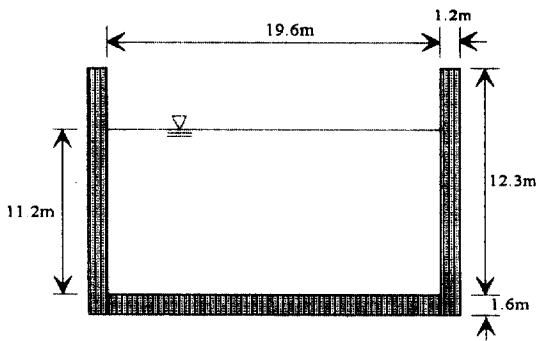


그림 6. 해석 대상 수조 구조물 단면.

$\ddot{x}_w(t)$ 가 Gaussian White Noise일때 $\{Y\}$ 는 Markov Vector Process이며 그 Covariance Matrix $[S]$ 는 다음식을 만족한다.

$$\frac{d}{dt}[S] = [P][S] + [S][P]^T + [B] \quad (38)$$

여기서,

$$S_{ij} = E\{Y_i Y_j\}$$

$$B_{ij} = E\{f_i Y_j\}, \quad B_{ij} = 0, \quad \text{단 } B_{10,10} = 2\pi S_0$$

위 식 (38)에 의해서는 비정상지반운동에 대한 비정상응답을 구할 수 있다. 그러나 정상응답을 구하고자 할 때는 식 (38)은 다음의 Lyapunov Matrix 방정식으로 변환된다.

$$[P][S] + [S][P]^T + [B] = [0] \quad (39)$$

R-FBI 시스템을 사용한 면진수조의 응답해석에는 마찰감쇠를 등가점성감쇠로 근사하였다. 이 때 식 (29)는 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\ddot{x}_b + (2\xi_b \omega_b + \beta_e) \dot{x}_b + \omega_b^2 x_b + d_b y = -\ddot{x}_g \quad (40)$$

여기서 등가감쇠 β_e 는 다음과 같이 정의된다.⁽⁴⁾

$$\beta_e = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{M_f}{M_b} \frac{\mu g}{\sigma_{x_b}} \quad (41a)$$

여기서,

$$M_f = m_b + \{1\}^T [T^*] \{1\} + M_j \quad (41b)$$

M_f : 모델링에 포함되는 전체유체질량

μ : 마찰계수

σ_{x_b} : \dot{x}_b 의 표준 편차

표 1. 수조구조물의 역학적 특성치

탄성계수E (N/m ²)	밀도ρ (kg/m ³)	포아송 비
20.79 × 10 ⁹	2300	0.17

g: 중력가속도

6. 면진수조 지진응답 해석

해석 대상 구조물은 높이 12.3 m, 폭 19.6 m, 유체 깊이가 11.2 m이고 한쪽 방향으로 길이가 긴 직사각형 수조구조물로서 그 단면은 그림 6에 주어진 바와 같다.

구조물의 철근 콘크리트 벽체는 강체로 모델링된 바닥 슬랩에 고정되어 있으며 벽체의 역학적 특성치는 표 1에 주어진 값들을 사용하였다. 동적 해석시 유체-구조물 연계계의 모드 감쇠비는 5%로 가정하였다.

면진 장치의 역학적 특성은 상부구조가 강체로 운동할 때의 면진시스템의 고유 진동수로 정의되는 유효진동수 ω_0 와 모드 감쇠비 ξ_0 에 의하여 표현하였으며 각각을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_b}{m_s + m_f}} \quad (42)$$

$$\xi_0 = \frac{c_f}{2\sqrt{k_b(m_s + m_f)}} \quad (43)$$

ω_0 : 유효진동수(rad/sec),

m_f, m_s 는 각각 상부구조물에 부가되는 유체질량과 구조물 전체질량

R-FBI 면진장치의 경우에는 마찰계수 μ 가 ω_0, ξ_0 에 추가하여 규정되어야 하고 본 논문에서는 0.05로 가정하였다.

수조구조물이 위치한 부지는 경암지반으로 가정하였으며 진원거리 10 km인 진원에서 단층파괴(Faulting) 지속시간 7초, 모멘트지진크기 $M_w = 6.7$ 인 지진에 의하여 부지에서 발생하는 지반운동을 입력 지반운동으로 사용하였다. 입력운동의 PSD 내용은 제2절에서 설명한 수정 C-P 모델에 의하여 기술하였으며 스펙트럼형상을 결정짓는 S_0 와 Filter Para-

표 2. 수정 C-P 모델의 Filter Parameter⁽⁴⁾

M_w	M_0 dyne-cm	S_0 cm ² /sec ³	$\frac{\omega_c}{2\pi}$ Hz	ξ_c	$\frac{\omega_g}{2\pi}$ Hz	ξ_g	$\frac{\omega_m}{2\pi}$ Hz	ξ_m
6.7	10^{26}	336.43	0.34	1.0	4.48	2.98	5.05	0.71

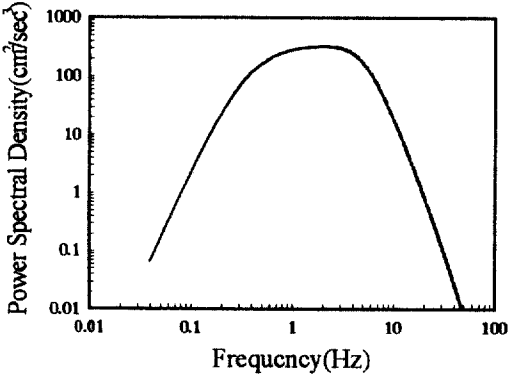


그림 7. 입력 지반운동의 PSD 함수.

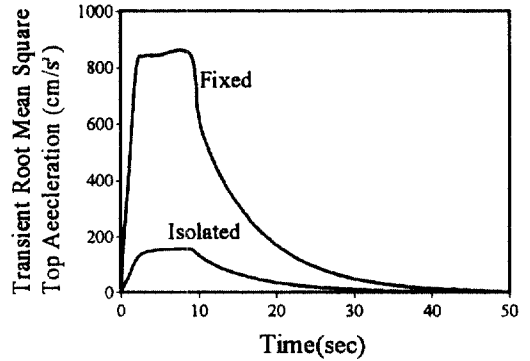


그림 9. 비정상 응답비교(구조물상단 가속도응답).

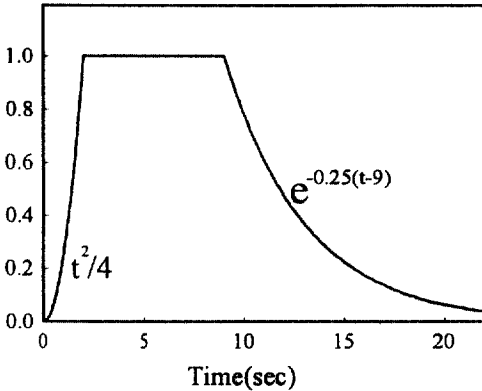


그림 8. 포락 함수.

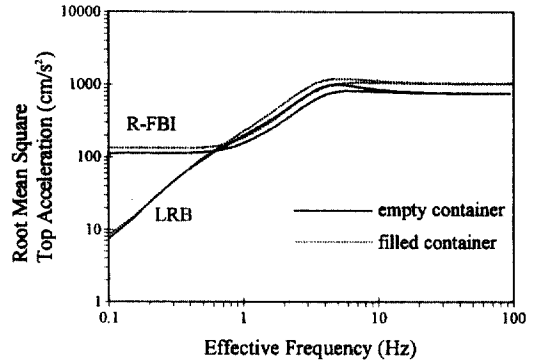


그림 10. 유효진동수 변화에 따른 구조물상단 가속도 응답변화 추이.

meter 들은 문헌^(4,11)에서 사용된 값들로서 표 2에 수록된 바와 같다.

입력지반운동으로 사용된 수정 C-P 모델의 Power Spectrum형상은 그림 7에 주어져 있다.

비정상 입력지반운동에 대한 면진구조의 응답특성을 파악하기 위하여 포락함수^(3,13)가 그림 8과 같이 주어진 경우에 유체를 담고있는 LRB 면진수조구조물의 응답을 식 (38)에 의하여 구한 후 그결과를 그림 9에 수록하였다. 여기서 강진지속시간은 단층 파괴 지속시간과 동일하다고보고 7초로 취하였다.

그림 9의 결과에서 비정상 입력운동의 경우에도 면진장치는 구조물의 가속도응답을 감소시키는데 극히 효과적임을 확인할 수 있다.

면진구조의 응답은 면진장치의 역학적 특성에 따라서 달라지게 되므로 유효진동수 변화에 따른 면진구조의 응답특성 변화 추이를 조사하였다. 그림 10과 11은 각각 유효진동수 변화에 따른 구조물상단에서의 RMS 가속도응답과 바닥슬랩의 RMS 변위응답을 면진시스템별로 비교한 것이다.

가속도응답(그림 10)은 유체가 있는 경우가 빈

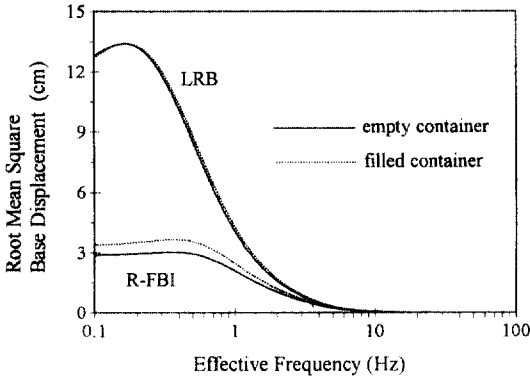


그림 11. 유효진동수 변화에 따른 바닥슬랩 상대변위 응답변화 추이.

수조의 경우보다 큰 값으로 산출되었으며 유효진동수 0.6 Hz 이상의 범위에서는 R-FBI 면진구조가 LRB에 비하여 작은 가속도응답을 갖는다. 그러나 0.6 Hz 이하의 범위에서는 감쇠비의 증가로 인하여 R-FBI 면진구조의 가속도응답이 LRB에 비하여 크게 산출되었다. 여기서(그림 9, 10) 구한 것은 절대 가속도로써 이는 지반가속도, 바닥슬랩가속도 및 상대가속도의 합으로 표시된다. 따라서 RMS 가속도응답은 이들 각각의 분산값과 공분산값을 합하여 계산하였다.

그림 11의 변위응답에서는 R-FBI 면진구조의 응답이 LRB 면진구조의 응답보다 작게 나타났다. 이러한 현상은 유효진동수가 1.0 Hz 이하인 범위에서 더 현저하며 그 원인은 마찰력에 의하여 증가된 감쇠효과 때문인 것으로 판단된다. 상기해석결과들은 Housner 방법에 의하여 유체 구조물 상호작용을 고려한 연구결과^{14,15)}와 매우 흡사함을 확인할 수 있었다.

7. 결 론

면진 수조구조물의 지진에 대한 응답특성을 해석하기 위하여 2차원 모델에 근거한 체계학적 해석 기법을 개발하였다. 선정된 수조구조물 모델에 대한 응답 해석 결과 면진장치는 수조구조물의 지반운동에 대한 가속도 응답을 크게 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 면진 시스템 종류별로 응답 특성을 비교한 결과 유효 진동수가 0.6 Hz 이상되는

범위에서는 R-FBI 시스템이 LRB 시스템에 비하여 그 성능이 우수함을 알 수 있었다. 유체의 Sloshing 고유진동수가 대체로 0.6 Hz 이하의 저진동수 영역에 속한다는 사실을 고려한다면, 수조구조물의 경우 면진시스템의 유효진동수는 Sloshing과의 동조현상을 유발할 수 있는 저진동수 영역보다 큰 값을 취하여야 할 것으로 판단된다. 따라서 R-FBI 시스템이 수조구조물에 적용하기에는 LRB 시스템보다 더 적합하다고 할 수 있을 것이다. 그러나 최근에는 고감쇠 특성을 보유한 LRB 면진장치가 개발되고 있으므로 이 경우에는 R-FBI 시스템이 반드시 우수하다고 단정지을 수는 없을 것이다.

본 논문에서는 유체의 Sloshing영향을 고려하지 아니하였으나, 개발된 기법은 Sloshing의 영향도 모델링할 수 있도록 쉽게 연장될 수 있다.

참고문헌

1. Housner, G.W., "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers", *Bull. Seismological Society of Am.* 47(1), Jan. 1957, pp. 15-35.
2. Wirching, P.H. and Yao, J.T.P., "Modal Response of Structures", *J. Struct. Div. ASCE*, 94(4), 1970, pp. 879-883.
3. Clough, R.W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc., 1975.
4. Lin, B.C., Tadjbakhsh, I.G., Papageorgiou, A. S. and Ahmadi, G., "Performance of Earthquake Isolation Systems", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 116(2), 1990, pp. 446-461.
5. Lin, Y.K. *Probabilistic Theory of Structural Dynamics*, McGraw-Hill, Inc., 1967.
6. Constantinou, Michalakis C. and Tadjbakhsh, Iradj G., "Hysteretic Dampers in Base Isolation: Random Approach", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 111(4), 1985, pp. 705-721.
7. Housner, G.W. and Jennings, P.C., "Generation of Artificial Earthquake", *Journal of Eng. Mech., ASCE*, Vol. 90, 1964, pp. 113-150.
8. *USNRC Regulatory Guide 1.60*, "Design Response Spectra for Nuclear Power Plants".
9. Shinozuka, M., Mochio, T. and Samaras, E.F. "Power Spectral Density Functions Compatible with NRC Regulatory Guide 1.60 Response Spectra", *NUREG/CR-3059 USNRC*.
10. *USNRC Standard Review Plan 3.7.1* "Seismic De-

- sign Parameters".
11. Papageorgiou, A.S., "On Two Characteristic Frequencies of Acceleration Spectra: Patch Corner Frequency and F_{max} ", *Bulletine of the Seismological society of America*, 78, 1988, pp. 509-529.
 12. Cook, Robert D., Malkus, David S. and Plesha, Michael E., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
 13. Amin, M. and Ang, A. H.-S., "Nonstationary Stochastic Models of Earthquakes", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 94(2), 1968, pp. 559-583.
 14. 하동호, '감진장치가 있는 수조구조물의 저진동수 응답특성을 고려한 추계학적해석', 공학석사학위논문, 서울대학교 토목공학과, 1992. 2.
 15. 하동호, 고현무, 김재관, 면진구조가 있는 수조구조물의 추계학적해석, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 320-323, 1992. 10.
- (接受: 1994. 1. 19)