

기초격리된 직사각형 유체 저장 구조물의 동적 해석

박 장 호

아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부
(2004. 7. 8. 접수 / 2004. 11. 30. 채택)

Dynamic Analysis of Base-Isolated Rectangular Liquid Storage Structures

Jang Ho Park

Division of Environmental, Civil and Transportation Engineering, Ajou University

(Received July 8, 2004 / Accepted November 30, 2004)

Abstract : The dynamic behavior of the rectangular liquid storage structure is known to be greatly influenced by fluid-structure interaction. By mounting the liquid storage structure on the properly designed base isolators, dynamic response of the superstructure can be reduced. However, base isolators inevitably incur large displacement of the structure to the ground and may give adverse effects on the sloshing height. This paper presents the analysis method for fluid-structure-isolator interaction in base-isolated rectangular liquid storage structures. In the method, the irrotational motion of inviscid and incompressible ideal fluid is expressed by analytic solutions and the superstructure and isolators are properly modeled by finite element and bilinear model. Free surface sloshing motion, hydrodynamic pressure acting on the wall and structural response are obtained by the presented method.

Key Words : rectangular liquid storage structure, base isolator, fluid-structure-isolator interaction, analytic solution

1. 서 론

사용후 핵연료 저장시설은 유체 내에 사용후 핵연료를 저장하기 위한 직사각형 평면을 갖는 대형 철근콘크리트 구조물로서 구조적 안전성과 기능을 유지하여 사용후 핵연료의 저장과 방사성 차폐 기능을 보장하여야 한다. 또한 내부 유체는 방사성 차폐를 위하여 유출이 방지되어야 하며 동시에 방사성 차폐에 필요한 최소수심을 유지하여야 한다. 일반적으로 유체 저장 구조물의 경우 지진과 같은 동하중이 작용할 경우 유체-구조물 상호작용에 의하여 구조물의 응답이 증폭되나, 기초격리장치를 유체 저장 구조물의 바닥 슬래브와 기초 사이에 설치하면 기초로부터 상부구조물로 전달되는 지진에너지를 차단하고 기초격리장치 자체의 감쇠특성에 의하여 상부구조물의 진동을 효과적으로 감소시켜 유체 저장 구조물의 구조적 안전성을 크게 향상시킬 수 있다. 따라서 지진에 대한 유체 저장 구조물의 안전성과 기능을 향상시킬 수 있는 방법으로 기

초격리장치의 설치를 들 수 있으며, 유체 저장 구조물에서 기초격리장치를 설치하는 것이 매우 효과적임이 연구와 적용 예에서 실증되고 있다¹⁾. 그러나, 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물은 기초격리장치가 설치되지 않은 유체 저장 구조물에 비해 지진 발생시 상부구조물과 지반과의 상대변위가 증가하여 구조물과 연결된 부속시설 등에 피해가 발생할 수 있다. 또한 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물에서는 상부구조물로 전달되는 지진하중이 기초격리장치에 의해 저진동수 특성을 나타내게 되어 저진동수 특성을 갖는 유체 자유수면의 sloshing을 증폭시켜 내부 유체의 유출을 야기할 수 있다. 따라서 기초격리장치를 설치하기 위해서는 유체 저장 구조물에서 구조물의 거동변화뿐만 아니라 유체 자유수면 sloshing의 변화까지도 정확히 평가할 수 있는 해석방법이 요구된다.

기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물의 동적 응답은 유체-구조물 상호작용 및 기초격리장치의 비선형 이력특성 등으로 인하여 매우 복잡한 양상을 보이므로 유체-구조물 상호작용과 기초격리장치의 비선형 이력특성을 고려하여야 한다. 유체 자유

수면의 sloshing을 고려한 유체-구조물 상호작용의 해석방법으로는 경계요소-유한요소 연계법을 이용한 해석법^{2,4)}, 유한요소법을 이용한 해석법⁵⁾, 유체에 대한 해석해를 이용한 방법⁶⁾ 등이 있으며, 비선형 재료감쇠 특성을 가진 기초격리장치의 거동은 이중선형 모델 또는 Ramberg-Osgood 모델 등을 적용하여 재현하고 있다^{7,8)}. 본 논문에서는 유한요소법, 경계요소법 등의 수치해석법보다 자유도를 줄일 수 있고 유체 자유수면에서 안정적인 해를 얻을 수 있는 유체 운동의 해석해를 이용한 방법으로 유체-구조물 상호작용을 모델링하고, 이중선형 모델을 사용하여 비선형 특성을 가지는 기초격리장치의 동적 거동을 적절하게 묘사함으로써 유체-구조물-기초격리장치 상호작용을 고려할 수 있는 해석방법을 제안하였다. 제안한 해석방법에 의한 예제해석을 통하여 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물의 동적 거동 특성을 파악하고 기초격리장치의 성능과 내진안전성을 파악하였다.

2 유체-구조물-기초격리장치 상호작용 해석

2.1. 유체-구조물 상호작용 해석

Fig. 1과 같은 직사각형 유체 저장 구조물의 벽체를 판요소를 이용한 유한요소로 모델링하면 수평 지반운동이 작용할 경우 유연한 구조물의 운동은 다음과 같은 이산화된 운동방정식으로 표현될 수 있다⁹⁾.

$$[M^s]\{\ddot{w}\} + [C^s]\{\dot{w}\} + [K^s]\{w\} = -[M^s]\{1\}\ddot{u}_{gx} + \{f\} \quad (1)$$

여기서, M^s , C^s , K^s 는 각각 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬을 나타내며, w 는 구조물 절점의 지반에 대한 상대변위를, \ddot{u}_{gx} 는 수평 지반가속도를 의미한다. 또한, f 는 유체 저장 구조물에서 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력에 의한 등가절점하중을 의미한다. 분포된 표면력을 절점력으로 변환하는 행렬 (distribution matrix) L 을 사용하여 구조물의 절점에 작용하는 등가절점하중을 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력 p 로 표현하면 다음의 식으로 표현될 수 있다. 이때 유체동압력 p 는 구조물의 강체거동에 의한 유체동압력 p_c 과 유연한 구조물의 변형에 의한 유체동압력 p_f 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$[M^s]\{\ddot{w}\} + [C^s]\{\dot{w}\} + [K^s]\{w\} = -[M^s]\{1\}\ddot{u}_{gx} - [L]\{p\} \quad (2)$$

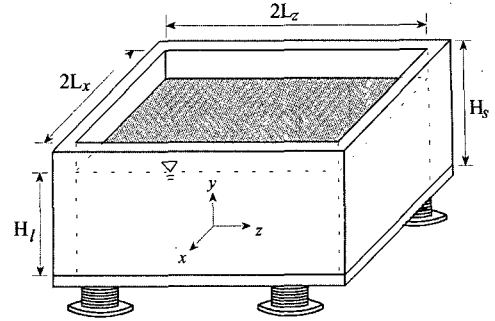


Fig. 1. Base-isolated rectangular liquid storage structure

Fig. 1과 같은 직사각형 유체 저장 구조물 내부 유체의 유동을 비압축성, 비점성의 이상유체로 가정하면 유체의 비회전 운동은 Eulerian 정식화에 근거하여 다음의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi(x, y, z, t) = 0 \quad (3)$$

여기서, $\phi(x, y, z, t)$ 은 속도 Potential을 의미한다.

유체 저장 구조물에 수평 지반운동이 작용하게 되면 유체는 유동을 하게 된다. 이때 유체의 유동은 구조물의 강체거동에 의한 유체의 유동과 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동의 합으로 표현될 수 있다.

수평 지반운동을 받을 때 구조물의 강체거동에 의한 유체의 유동은 유체 자유수면에서 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건을 만족시켜야 한다¹⁰⁾. 평균 수면에서 자유수면까지의 높이를 $\eta(x, z, t)$ 라고 하면 유체 자유수면 그리고 구조물과 유체의 경계면에서의 선형화된 경계조건들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{y=H_l} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \ddot{u}_{gx}x + g\eta = 0 \Big|_{y=H_l} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \Big|_{x=\pm L_x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \Big|_{z=\pm L_z} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \ddot{u}_{gx}x = 0 \quad (9)$$

수평 지반운동을 받고 강제거동을 하는 구조물 내부 유체의 속도 Potential은 z방향으로 일정하므로 변수분리법을 사용하여 식 (6), 식 (7), 식 (8)을 만족하는 Laplace 방정식의 해를 구하면 다음과 같은 z와 무관한 2차원의 급수 형태로 얻어진다.

$$\phi_r^h = \sum_{m=0}^{\infty} \text{sink}_m x \cdot \cosh k_m y \cdot f_m^*(t) \quad (10)$$

여기서, $k_m = \frac{2m+1}{2L_x} \pi$ 이고, $f_m^*(t)$ 은 미지의 계수이다. Laplace 방정식의 해 ϕ_r^h 를 식 (4)에 대입하여 자유수면의 높이 η_r^h 를 구하고, Laplace 방정식의 해 ϕ_r^h 와 자유수면의 높이 η_r^h 를 식 (5)에 대입한 후 직교성(Orthogonality)을 적용하면 계수 $f_m^*(t)$ 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$f_m^*(t) = \left[f_m^*(t - \Delta t) \left[\frac{1}{\Delta t} - g \cdot k_m \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot \tanh k_m H \right] - g \cdot k_m \cdot \tanh k_m H \cdot F_m^*(t - \Delta t) - \ddot{u}_{gx} \left[\frac{(-1)^m}{k_m^2} \right] \left/ \left[\left[\frac{L_x}{2} \right] \cosh k_m H \right] \right. \right] / \left[\frac{1}{\Delta t} + g \cdot k_m \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot \tanh k_m H \right] \quad (11)$$

여기서, $F_m^*(t - \Delta t) = \int_0^{t-\Delta t} f_m^*(t - \Delta t) dt$ 이고, Δt 는 시간 증분을 의미한다. 식 (11)로부터 수평 지반운동을 받을 때 구조물의 강제거동에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력과 유체 자유수면의 sloshing 높이를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$p_r^h = -\rho \left[\sum_{m=0}^{\infty} \text{sink}_m x \cdot \cosh k_m y \times \frac{f_m^*(t) - f_m^*(t - \Delta t)}{\Delta t} + \ddot{u}_{gx} x \right] \quad (12)$$

$$\eta_r^h = \sum_{m=0}^{\infty} k_m \cdot \text{sink}_m x \cdot \sinh k_m H \cdot [F_m^*(t - \Delta t) + \{f_m^*(t) + f_m^*(t - \Delta t)\} \frac{\Delta t}{2}] \quad (13)$$

유체 저장 구조물이 수평 지반운동을 받을 때 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동은 유체 자유수면 그리고 구조물과 유체의 경계면에서 다음과 같은 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건을 갖는다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{y=H_i} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \Big|_{y=H_i} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial w_x}{\partial t} \Big|_{x=\pm L_x} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial w_z}{\partial t} \Big|_{z=\pm L_z} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} = 0 \quad (19)$$

여기서, w_x 와 w_z 는 각각 x방향과 z방향 구조물 변위를 나타낸다.

변수분리법을 사용하여 식 (16), 식 (17), 식 (18)을 만족하는 Laplace 방정식의 해를 구하면 다음과 같이 급수의 형태로 얻어진다.

$$\phi_f^h = \sum_{n=0}^{\infty} \sinh k_n x \cdot \cos k_n y \cdot q_{1n}^*(z, t) + \sum_{n=0}^{\infty} \cos k_n y \cdot \cosh k_n z \cdot q_{2n}^*(x, t) \quad (20)$$

여기서, $k_n = \frac{2n+1}{2H} \pi$ 이고, 식 (20)에서 첫번째 항은 $\frac{\partial w_z}{\partial t} \Big|_{z=\pm L_z} = 0$ 인 경우의 해이고 두번째 항은 $\frac{\partial w_x}{\partial t} \Big|_{x=\pm L_x} = 0$ 인 경우의 해이다. 그리고 계수 $q_{1n}^*(t)$ 과 $q_{2n}^*(t)$ 는 다음과 같이 구하여진다.

$$q_{1n}^*(z, t) = \int_{-H}^H \dot{w}_x(y, z) \cdot \cos k_n y dy / [k_n \cdot \cosh k_n L_x] / H \quad (21)$$

$$q_{2n}^*(x, t) = \int_{-H}^H \dot{w}_z(y, z) \cdot \cos k_n y \, dy \quad (22)$$

$$\left/ [k_n \cdot \sinh k_n L_z] \right/ H$$

식 (21)과 식(22)에서 구조물의 변위 w 를 구조물의 모드 ξ 와 모드좌표 r 로 표현하면 수평 지반운동을 받을 때 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력과 유체 자유수면의 sloshing 높이를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$p_f^h = -\rho \sum_{n=0}^{\infty} \sinh k_n x \cdot \cos k_n y \quad (23)$$

$$\times \sum_i \ddot{r}_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(y, z) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right)$$

$$\left/ [k_n \cdot \cosh k_n L_x] \right/ H$$

$$- \rho \sum_{n=0}^{\infty} \cos k_n y \cdot \cosh k_n z$$

$$\times \sum_i \ddot{r}_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(x, y) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right)$$

$$\left/ [k_n \cdot \sinh k_n L_z] \right/ H$$

$$\eta_f^h = -\sum_{n=0}^{\infty} \sinh k_n L_x \cdot \sin k_n y \quad (24)$$

$$\times \sum_i r_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(y, z) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right)$$

$$\left/ [\cosh k_n L_x] \right/ H$$

$$- \sum_{n=0}^{\infty} \sin k_n y \cdot \cosh k_n L_z$$

$$\times \sum_i r_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(x, y) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right)$$

$$\left/ [\sinh k_n L_z] \right/ H$$

수평 지반운동을 받는 경우 유체 저장 구조물에서 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력은 구조물의 강체거동에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력 식 (12)와 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력 식 (23)의 합으로 표현되며, 이를 구조물의 운동방정식 식 (2)에 대입함으로써 유체-구조물 연계시스템의 이산화된 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$[M^s + M^A] \{\ddot{w}\} + [C^s] \{\dot{w}\} + [K^s] \{w\} = -[M^s] \{1\} \ddot{u}_{gx} - [L] \{p_f^h\} \quad (25)$$

식 (25)에서 M^A 는 수평 지반운동이 작용할 때 유연한 구조물의 변형에 의해 발생하는 유체동압력에 의한 부가질량으로 표면력을 질점력으로 변환하는 행렬과 유연한 구조물의 변형에 의해 발생하는 유체동압력 그리고 구조물의 고유모드의 곱 $[L][\rho_f^h]\xi^T$ 로부터 얻어진다. 식 (25)로부터 구조물의 응답을 구할 수 있으며, 유체동압력은 식 (12)와 식 (23)의 합으로 그리고 유체 자유수면의 sloshing은 식 (13)과 식 (24)의 합으로부터 얻어진다.

2.2. 유체-구조물-기초격리장치 상호작용 해석

구조물의 바닥과 기초 사이에 기초격리장치를 설치함으로써 지진과 같은 동하중으로부터 구조물의 손상을 줄임과 동시에 구조물의 안전성을 향상시킬 수 있다. 이는 기초격리장치가 상부구조물로 전달되는 지진하중을 기초격리장치 자체의 유연성으로 저진동수대로 이동시키며, 자체의 감쇠로 지진 에너지를 감소시켜 구조물의 안전성을 증대시키는 것이다.

현재 사용되는 사용되고 있는 대부분의 기초격리장치의 재료들은 비선형 이력특성을 가지며, 적층고무를 이용한 기초격리장치들은 이러한 이력특성을 확연히 보여준다. 기초격리장치에는 다양한 종류가 있으며, 그 중에서 HDRB는 추가적인 장치 없이 재료의 비선형 이력특성을 효율적으로 이용한 기초격리장치이다. HDRB는 그 복원력 특성에 있어 매우 큰 비선형성을 보이므로 유효강성과 등가감쇠계수를 이용한 선형모델로는 비선형 이력특성을 적절히 표현할 수 없으며 이를 모델화하기 위해서는 재료 비선형 모델이 필요하다. 이러한 비선형 모델 중에서 널리 사용되는 방법 중의 하나가 Fig. 2의 이중선형 모델이다⁸⁾.

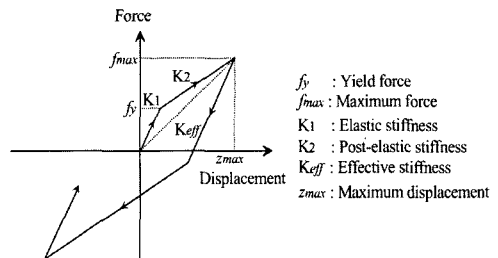


Fig. 2. Bi-Linear model

이중선형 모델에서 기초격리장치의 복원력은 다음의 식으로 표현된다.

$$F(z) = k_b z + c \quad (26)$$

여기서, z 는 기초격리장치의 변위를, c 는 변위에 따른 기초격리장치의 강성 k_b 에 의해 결정되는 상수이다.

기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물의 하부구조는 상부구조물의 바닥과 기초격리장치로 구성된다. Fig. 1과 같은 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물에 수평 지진하중이 작용할 경우 하부구조의 운동은 기초격리장치의 복원력인 식 (26)으로부터 다음과 같이 기술된다.

$$m_b(\ddot{u}_{gx} + \ddot{z}) + c_b \dot{z} + k_b z + c = -\{1\}^T \left([M]\{\dot{w}\} + [M']\{1\}(\ddot{u}_{gx} + \ddot{z}) + \{P, \} \right) \quad (27)$$

여기서 m_b 는 상부구조물 바닥의 질량을 나타낸다. 상부구조물의 운동방정식 식 (25)과 하부구조의 운동방정식 식 (27)을 연계하면 다음과 같은 유체-구조물-기초격리장치 상호작용을 고려할 수 있는 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M & M'\{1\} \\ \{1\}^T M & \{1\}^T M'\{1\} + m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{w} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C^s & 0 \\ 0 & c_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{w} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K^s & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ z \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} M' & 0 \\ 0 & \{1\}^T M'\{1\} + m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{1\} \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_{gx} - \begin{Bmatrix} P, \\ \{1\}^T P, + c \end{Bmatrix} \quad (28)$$

식 (28)을 이용하여 유체-구조물 상호작용과 기초격리장치의 비선형 거동 특성을 고려한 유체-구조물-기초격리장치 상호작용을 해석할 수 있다.

3. 해석예

본 논문에서 제안한 해석방법을 이용하여 형상은 Fig. 1과 같으며, 수심 $H_t = 12m$, 구조물의 높이 $H_s = 15m$, 폭 $2L_x = 20m$, 길이 $2L_z = 60m$, 두께 $1.2m$ 인 기초격리된 직사각형 유체 저장 구조물 모델에 대하여 유체-구조물-기초격리장치 상호작용 해석을 수행하였다. 구조물의 재료특성은 밀도 $\rho = 2400kg/m^3$, 탄성계수 $E = 2.1 \times 10^{10} N/m^2$, 포아송비 $\nu = 0.17$ 이다. 기초격리장치가 설치된 구조물의 경우 상부구조물

은 강체에 가까운 거동을 하여 감쇠의 영향이 미약하므로 구조물의 감쇠는 무시하였다. 입력지반운동으로 1940년 Imperial Valley 지진시 El Centro Valley Irrigation District에서 계측된 N-S 방향 가속도 시간이력을 사용하였고, 최대가속도는 $0.2g$ 로 하였다.

일반적으로 기초격리장치가 설치된 구조물은 유효진동수가 $0.5Hz$ 에서 $1.0Hz$ 사이에 오도록 설계되므로 본 논문에서도 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물의 유효진동수가 $0.5Hz$ 에서 $1.0Hz$ 사이가 되도록 3가지 형태의 기초격리장치 모델을 선정하여 해석을 수행하고, 기초격리장치의 유효진동수에 따른 상부구조물의 거동 변화를 살펴보았다.

기초격리장치에 따른 구조물 바닥의 지반에 대한 상대변위의 시간이력을 Fig. 3에 도시하였다. 기초격리장치가 유연할수록 진동수는 감소하나 지반에 대한 상대변위가 증가하고 있다. 사용후 핵연료 저장조에서 이러한 구조물 바닥의 상대변위 증가는

Table 1. Mechanical properties of isolator models

	$K_1(MN)$	$K_2(MN)$	$Z_2(m)$
Isolator model I	367.1	141.2	0.005
Isolator model II	734.1	282.4	0.005
Isolator model III	1468.2	565.7	0.005

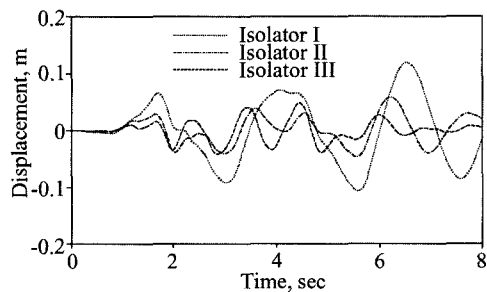


Fig. 3. Time histories of displacement at the bottom of the superstructure for different isolator models

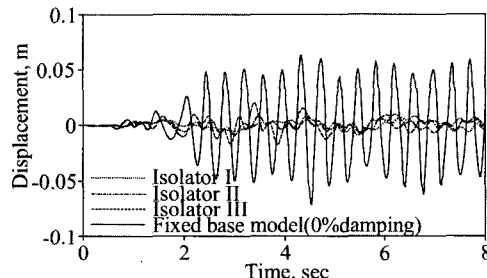


Fig. 4. Time histories of displacement at the top of the superstructure for different isolator models

파이프계통과 같이 유체 저장 구조물에 연결된 부속시설에 심각한 피해를 초래할 수 있다. 따라서 유체 저장 구조물에 기초격리장치를 적용할 경우에는 변위에 대한 적절한 한계를 두어 상대변위가 이 한계를 초과하지 않도록 기초격리장치의 특성을 결정하여야 할 것이다.

기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물에서 기초격리장치의 특성에 따른 상부구조물의 바닥에 대한 구조물 벽면 중앙 상단에서의 상대변위 시간이력을 계산하여 기초격리장치가 설치되지 않은 유체 저장 구조물에서의 변위와 비교하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기초격리장치를 적용함으로써 상부구조물의 바닥에 대한 구조물 벽면의 상대변위가 현저히 감소하였으며, 기초격리장치가 유연할수록 상대변위가 더 많이 감소되고 있다.

기초격리장치가 설치된 직사각형 유체 저장 구조물에서 기초격리장치의 특성에 따른 구조물 벽면 중앙에서의 유체 자유수면 높이의 시간이력을 계산하여 기초격리장치가 설치되지 않은 유체 저장 구조물에서의 결과와 비교하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물에서는 진동수 2.7Hz를 갖는 구조물의 변형에 의하여 발생하는 유체 자유수면의 sloshing이 나타나지 않고 있다. 이는 기초격리장치에 의하여 상부구조물이 강체에 가까운 거동을 하고 있음을 의미한다. 그러나 유체 자유수면의 sloshing은 기초격리장치가 도입됨으로써 증폭되고 있다. 따라서 기초격리장치에 의한 유체 자유수면의 sloshing 증폭은 기초격리장치의 설계시 반드시 고려되어야 할 사항으로 판단된다.

Fig. 6에 기초격리장치가 설치되지 않은 유체 저장 구조물과 기초격리장치가 설치된 직사각형 유체 저장 구조물에서의 구조물 벽면 중앙에 작용하는 유체동압력의 최대값을 구하고 그때의 분포를 도시

하였다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 기초격리장치가 구조물의 감쇠보다 구조물 벽면에 작용하는 유체동압력을 줄이는데 더욱 효과적임을 알 수 있다. 또한 기초격리장치가 유연할수록 구조물의 거동은 강체에 가까워지며, 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력도 크게 감소하고 있다. 또한 Fig. 7과 Fig. 8은 기초격리장치가 설치되지 않은 유체 저장 구조물과 기초격리장치가 설치된 직사각형 유체 저

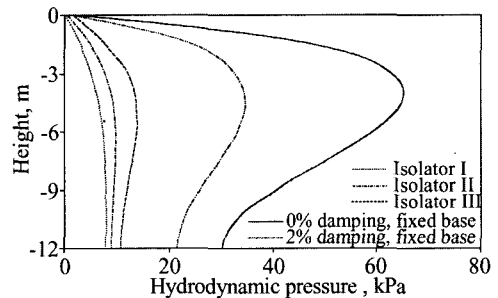


Fig. 6. Hydrodynamic pressure distribution acting on the wall for different isolator models

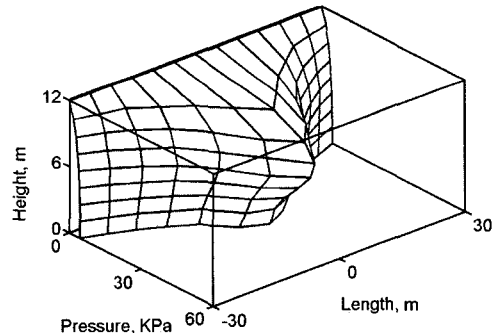


Fig. 7. Spatial hydrodynamic pressure distribution in a fixed base model

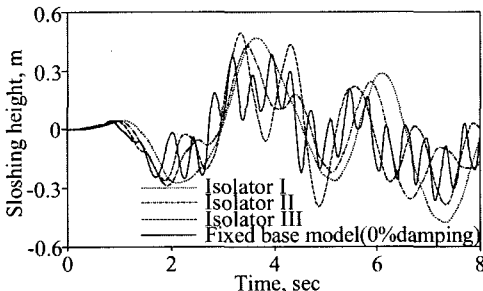


Fig. 5. Time histories of free surface sloshing motion for different isolator models

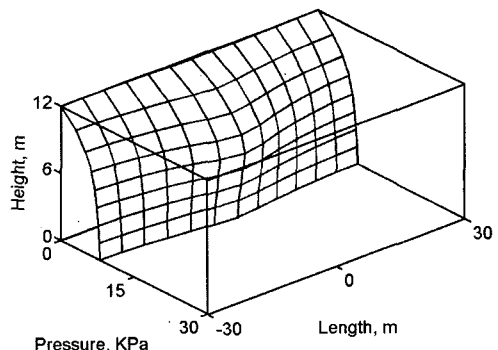


Fig. 8. Spatial hydrodynamic pressure distribution in a base-isolated model with isolator model I

장 구조물에서 구조물 벽면에 작용하는 유체동압력의 3차원 분포를 도시한 것이다. 두 결과를 비교하여 보면 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물에서의 유체동압력은 기초격리장치에 의하여 상부 구조물이 강체에 가까운 거동을 함으로써 구조물 길이방향으로 큰 변화 없이 거의 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

기초격리장치는 두 가지 기능에 의하여 상부구조물의 동적 응답을 변화시킬 수 있다. 첫 번째는 기초격리장치의 유연성을 이용하여 상부구조물로 전달되는 지진에너지의 진동수 특성을 변화시키는 것이며, 두 번째는 기초격리장치의 감쇠에 의해 지진 에너지를 감소시키는 것이다. 이러한 기초격리장치의 특성은 유체 저장 구조물의 구조적 안전성을 크게 향상시킬 수 있으나, 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물에서는 기초격리장치가 설치되지 않은 유체 저장 구조물에 비해 지진 발생시 상부구조물과 지반과의 상대변위가 증가하여 구조물과 연결된 부속시설 등에 피해가 발생할 수 있다. 또한 기초격리장치의 저진동수 특성에 의하여 저진동수 특성을 갖는 유체 자유수면의 sloshing이 증폭될 수 있으므로 유체 저장 구조물에 기초격리장치를 도입하기 위해서는 이에 대한 정확한 해석이 요구하다.

본 논문에서는 유체 운동의 해석해를 이용한 유체-구조물 상호작용 해석방법과 기초격리장치에 대한 이중선형 모델을 이용하여 유체-구조물-기초격리장치 상호작용을 고려할 수 있는 해석방법을 제안하였다. 유체 운동의 해석해를 이용한 유체-구조물 상호작용 해석방법은 유한요소법, 경계요소법 등의 수치해석법에 비하여 자유수면에서의 해가 안정적이며, 모델링이 간편하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한, 기초격리장치에 대한 이중선형 모델은 기초격리장치의 비선형 이력특성을 적절히 표현할 수 있는 효율적인 모델이다.

제한한 해석방법을 이용한 예제해석을 통하여 기초격리장치가 설치된 유체 저장 구조물에서 발생하는 동적 응답과 기초격리장치의 성능을 파악하였다. 유체 저장 구조물과 기초 사이에 기초격리장치를 부착할 경우 상부구조물의 바닥에 대한 상대변위와 가속도는 크게 감소하여 구조물의 안전성을 향상시킬 수 있다. 구조물 벽면에 작용하는 유체동압력도

기초격리장치를 도입함으로써 크게 감소된다. 이러한 현상은 기초격리장치가 유연할수록, 감쇠비가 클수록 크게 나타난다. 그러나 기초격리장치의 유연성이 커질 경우 지반에 대한 구조물 바닥의 상대변위가 증가하게 되어 사용후 핵연료 저장시설에서 저장시설과 연결된 파이프 계통 등의 부속시설에 심각한 피해를 초래할 수 있으므로 변위에 대한 한계의 설정이 필요하다. 또한 유체 저장 구조물에 기초격리장치를 부착할 경우 기초격리장치의 저진동수 특성으로 인하여 저진동수 특성을 갖는 유체 자유수면의 sloshing이 증폭되어 내부 유체의 유출과 같은 문제가 발생하지 않도록 기초격리장치의 설계시에는 기초격리장치의 유효진동수와 유체 자유수면의 sloshing 진동수가 근접하지 않도록 주의하여야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Chalhoub, M. S. and Kelly, J. M., "Shake table test of cylindrical water tanks in base-isolated structure", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 116, pp. 1451~1472, 1990.
- 2) 고현무, 김재관, 박장호, "경계요소-유한요소 연계법에 의한 구형 수조구조물의 동적거동 특성 해석", *대한토목학회 논문집*, 제14권, pp. 1033~1042, 1994.
- 3) Koh, H. M., Kim, J. K. and Park, J. -H., "Fluid-structure interaction on analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27 pp. 109~124, 1998.
- 4) Park, J.-H., Koh, H. M. and Kim, J. K., "Seismic isolation of pool-type tanks for the storage of nuclear spent fuel assemblies", *Nuclear Engineering and Design*, 199/1-2, pp. 143~154, 2000.
- 5) Takashi, N., "ALE Finite Element Computations of Fluid-Structure Interaction Problems", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 112, pp. 291~308, 1994.
- 6) 박장호, "유체 운동의 해석해를 이용한 직사각형 유체 저장 구조물의 동적 해석", *대한토목학회 논문집*, 제24권, pp. 73~78, 2004.
- 7) Sasayama, Y., Kobatake, M. and Takenaka, Y., "Design of twin base-isolated building for admini-

- stration center of thermal power stations”, Proceeding of 11th International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation of Nuclear and Non-nuclear Structures, 1991.
- 8) Ishida, K., “Design guidelines for buildings with seismic isolation”, Proceeding of 12th International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Control of Structures, 1993.
- 9) Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. and Witt, R. J., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, 2002.
- 10) Currie, I. G., Fundamental mechanics of fluid, McGraw-Hill Inc., 1974.