

수평 및 수직 지반운동을 받는 직사각형 유체 저장 구조물의 동적 해석

박 장 호

아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부
(2004. 7. 8. 접수 / 2004. 9. 2. 채택)

Dynamic Analysis of Rectangular Liquid Storage Structures Excited by Horizontal and Vertical Ground Motions

Jang Ho Park

Division of Environmental, Civil and Transportation Engineering, Ajou University

(Received July 8, 2004 / Accepted September 2, 2004)

Abstract : Dynamic analysis method is presented for analyzing rectangular liquid storage structures excited by horizontal and vertical ground motions. The irrotational motion of invicid and incompressible ideal fluid in rigid rectangular liquid storage structures subjected to horizontal and vertical ground motions and the motion of fluid induced by structural deformation are expressed by analytic solutions. Analysis methods are obtained by applying analytic solutions of the fluid motion to finite element equation of the structural motion. The fluid-structure interaction effect is reflected into the coupled equation as added fluid mass matrix. The free surface sloshing motion, hydrodynamic pressure acting on the wall and structural behavior due to horizontal and vertical ground motions are obtained by the presented method.

Key Words : rectangular liquid storage structure, horizontal and vertical ground motions, analytic solutions

1. 서 론

액체를 저장하기 위해서는 원통형 또는 원형의 구조물이 많이 사용되고 있으나, 사용 후 핵연료 저장시설과 같이 무거운 물체를 유체 내에 저장하기 위해 건설되는 시설에는 직사각형 평면을 갖는 대형 철근콘크리트 구조가 사용된다. 이러한 유체 저장 구조물들은 지진이 발생할 경우 내부의 유체가 유동을 하게 되고 유체와 구조물 간에 상호작용이 발생하여 복잡한 거동을 보이게 된다. 따라서 사용 후 핵연료 저장시설과 같이 안전성이 중요한 유체 저장 구조물의 경우에는 구조물의 동적 거동 및 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력 뿐만 아니라 유체 자유수면의 sloshing까지 평가할 수 있는 유체-구조물 상호작용 해석이 요구된다.

초기의 유체 저장 구조물의 해석 및 설계에는 구조물이 강체로 거동한다고 가정하여 유체동압력을

산출하는 방법들이 사용되었으나¹⁾, 유체와 유연한 구조물의 상호작용으로 인하여 실제 유체 저장 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력이 강체구조물 모델에서 발생하는 것보다 수 배 이상 증폭될 수 있음이 밝혀졌다. 이 후 유체 저장 구조물에 대한 해석방법으로 경계요소-유한요소 연계법을 이용한 해석법^{2,4)}, 유한요소법을 이용한 해석법⁵⁾, 해석해를 이용한 방법⁶⁻⁸⁾ 등에 대한 연구가 이루어졌다. 유한요소법이나 경계요소-유한요소 연계법을 이용한 수치 해석법의 경우 유체 자유수면의 sloshing이 고려된 동적 해석을 수행할 수 있으나, 유체 자유수면의 sloshing이 모델링에 매우 민감하기 때문에 모델링에 유의하여야 하며 이로 인하여 모델링에 많은 시간이 소요되고, 절점의 증가로 인하여 해석에 많은 시간이 소요된다. 반면 해석해를 이용한 방법은 해석이 편리하며 해석에 소요되는 시간은 짧으나, 유체 자유수면 sloshing의 영향을 반영하지 못하고 있다.

본 논문에서는 수평 및 수직 지반운동을 받는 직

사각형 단면을 갖는 유체 저장 구조물 내부의 유체 운동에 대한 해석해를 구하고, 이를 유한요소로 모델링한 구조물의 운동과 연계시킴으로써 유체 자유수면의 sloshing을 고려하고 유체-구조물 상호작용을 보다 간편하게 평가할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 수평 및 수직 지반운동을 받는 비점성, 비압축성 이상유체의 비회전 운동에 대한 해석해를 구조물의 강제거동에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 성분과 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 성분으로 나누어 구하였다. 그리고 유체 운동의 해석해와 유한요소로 모델링된 구조물의 운동을 연계하였다. 본 논문에서 제안한 해석기법은 유한요소법이나 경계요소-유한요소 연계법과는 달리 유체의 모델링을 생략함으로써 모델링이 간편하고 절점의 감소로 해석시간을 줄일 수 있는 장점을 지니고 있으며, 해석해를 이용한 방법들에서는 고려하지 못한 유체 자유수면의 sloshing을 고려하고 있다. 제안한 해석기법을 이용하여 수평 및 수직 지반운동을 받는 직사각형 유체 저장 구조물에 대한 동적 해석을 수행하고 이로부터 유체 저장 구조물의 동적 거동 특성을 파악하였다.

2. 지반운동을 받는 유체 저장 구조물에서의 유체-구조물 상호작용

수평 및 수직 지반운동을 받는 직사각형 유체 저장 구조물에 대한 유체-구조물 상호작용 해석기법을 개발하였다.

2.1. 구조물 운동의 모델링

Fig. 1과 같은 직사각형 유체 저장 구조물을 판요소를 이용한 유한요소로 모델링하면 수평 및 수직 지반운동을 받는 구조물의 운동은 다음과 같은 이산화된 운동방정식으로 표현될 수 있다⁹⁾.

$$[M]\{\ddot{w}\} + [C]\{\dot{w}\} + [K]\{w\} = -[M][E]\{\ddot{u}_g\} + \{f\} \quad (1)$$

여기서 M, C, K는 각각 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬을 나타내며, w는 구조물 절점의 지반에 대한 상대변위를, \ddot{u}_g 는 지반가속도를 의미한다. 또한, f는 유체 저장 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력에 의한 등가절점하중을, E는 지진력 영향계수 행렬을 의미한다. 분포된 표면력을 절점력으로 변환하는 행렬 L을 사용하여 구조물의 절점에 작용하는

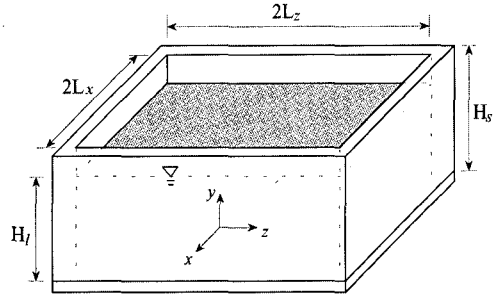


Fig. 1. Rectangular liquid storage structure

등가절점하중을 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력 p로 표현하고, 모드해석을 수행하여 구조물 모드행렬 ξ 와 모드좌표 r을 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$[\xi]^T [M] [\xi] \{\ddot{r}\} + [\xi]^T [C] [\xi] \{\dot{r}\} + [\xi]^T [K] [\xi] \{r\} = -[\xi]^T [M][E] \{\ddot{u}_g\} - [\xi]^T [L] \{p\} \quad (2)$$

2.2. 수평 지반운동을 받는 유체 운동의 해석

유체 저장 구조물 내부 유체를 비압축성, 비점성의 이상유체로 가정하면 유체의 비회전 운동은 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 강제거동에 의한 유체의 유동과 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동의 합으로 표현될 수 있다.

유체 저장 구조물이 x방향 수평 지반운동을 받을 때 구조물의 강제거동에 의한 유체의 유동은 유체 자유수면과 구조물과 유체의 경계면에서 다음과 같은 선형화된 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건을 만족시켜야 한다¹⁰⁾.

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

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

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

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

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

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

여기서, $\eta(x,z,t)$ 는 평균 수면에서 자유수면까지의 높이를 나타내며, \ddot{u}_{gx} 는 x방향 지반 가속도를 의미한다.

x방향 수평 지반운동을 받고 강제거동을 하는 구조물 내부 유체의 속도 potential은 변수분리법을 사용하여 식 (10a)로 나타낼 수 있으며¹⁰⁾, 식 (6), 식 (7), 식 (8)을 만족하는 Laplace 방정식의 해를 구하면 식 (10b)와 같이 z와 무관한 2차원의 급수 형태로 얻어진다.

$$\phi_r^h = (A \cos \alpha x + B \sin \alpha x)(C \cosh k y + D \sinh k y)(E \cos \beta z + F \sin \beta z) \quad (10a)$$

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

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 시간증분을 의미한다. 식 (11)로부터 x방향 수평 지반운동을 받을 때 구조물의 강제거동에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력과 유체 자유수면 sloshing 높이는 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

여기서, w_x 와 w_z 는 각각 x방향과 z방향 구조물의 변위를 의미한다.

변수분리법에 사용하여 Laplace 방정식을 만족하는 해를 식 (20a)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (16), 식 (17), 식 (18)을 만족하는 해를 구하면 x 방향으로 는 역대칭이고 z 방향으로 는 대칭인 형상에 의하여

식 (20b)와 같은 급수의 형태로 얻어진다.

$$\begin{aligned} \phi_f^h &= (A \cosh \alpha x + B \sinh \alpha x)(C \cos k y \\ &\quad + D \sin k y)(E \cosh \beta z + F \sinh \beta z) \quad (20a) \\ \phi_f^h &= \sum_{n=0}^{\infty} \sinh k_n x \cdot \cos k_n y \cdot q_{1n}^*(z, t) \\ &\quad + \sum_{n=0}^{\infty} \cos k_n y \cdot \cosh k_n z \cdot q_{2n}^*(x, t) \quad (20b) \end{aligned}$$

여기서, $k_n = \frac{2n+1}{2H} \pi$ 이고, 식 (20b)에서 첫 번째 항은 $\left. \frac{\partial w_z}{\partial t} \right|_{z=\pm L_z} = 0$ 인 경우의 해이고 두 번째 항은 $\left. \frac{\partial w_x}{\partial x} \right|_{x=\pm L_x} = 0$ 인 경우의 해이다. 그리고 계수 $q_{1n}^*(t)$ 과 $q_{2n}^*(t)$ 는 직교성에 의하여 다음과 같이 구하여질 수 있다.

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

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

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

$$\begin{aligned} p_f^h &= -\rho \sum_{n=0}^{\infty} \sinh k_n x \cdot \cos k_n y \\ &\quad \times \sum_i \ddot{r}_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(y, z) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right) \\ &\quad \Big/ [k_n \cdot \cosh k_n L_x] \Big/ H \\ &\quad - \rho \sum_{n=0}^{\infty} \cos k_n y \cdot \cosh k_n z \\ &\quad \times \sum_i \ddot{r}_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(x, y) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right) \\ &\quad \Big/ [k_n \cdot \sinh k_n L_z] \Big/ H \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_f^h &= - \sum_{n=0}^{\infty} \sinh k_n L_x \cdot \sin k_n y \\ &\quad \times \sum_i r_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(y, z) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right) \\ &\quad \Big/ [\cosh k_n L_x] \Big/ H \\ &\quad - \sum_{n=0}^{\infty} \sin k_n y \cdot \cosh k_n L_z \\ &\quad \times \sum_i r_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(x, y) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right) \\ &\quad \Big/ [\sinh k_n L_z] \Big/ H \quad (24) \end{aligned}$$

유체동압력은 대류성분(convective component)과 충격성분(impulsive component)의 합으로 표현되기도 한다. 본 논문에서 유도한 식들을 이용하면 대류성분은 구조물의 강체거동에 의한 유체동압력 식 (12)에서 $-\rho \ddot{u}_{gx} x$ 항을 제외한 것으로, 충격성분은 구조물의 변형에 의한 유체동압력 식 (23)에 $-\rho \ddot{u}_{gx} x$ 항을 더한 것으로 간단히 구할 수 있다.

2.3. 수평 지반운동을 받는 구조물에서의 유체와 구조물의 상호작용 연계

수평 지반운동을 받는 경우 직사각형 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 상호작용이 유체의 부가질량의 형태로 표현되는 유체-구조물 연계시스템의 이산화된 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [M_n + M^{Ah}] \{\ddot{r}\} + [C_n] \{\dot{r}\} + [K_n] \{r\} \\ = -[\Gamma_n][E] \{\ddot{\xi}_g\} - [\xi]^T [L] \{p_f^h\} \quad (25) \end{aligned}$$

식 (25)에서 M^{Ah} 는 수평 지반운동이 작용할 때 유연한 구조물의 변형에 의해 발생하는 유체동압력에 의한 부가질량으로써 구조물의 고유모드와 표면력을 절점력으로 변환하는 행렬 그리고 유연한 구조물의 변형에 의해 발생하는 유체동압력의 곱인 $[\xi]^T [L] [p_f^h]$ 으로부터 얻어진다.

2.4. 수직 지반운동을 받는 유체 운동의 해석

직사각형 단면을 갖는 유체 저장 구조물에 y방향 수직 지반운동이 작용할 경우에도 유체의 유동은 Laplace 방정식 식 (3)을 만족한다.

유체 저장 구조물이 y방향 수직 지반운동을 받을 때 구조물의 강제거동에 의한 유체의 유동은 유체 자유수면과 구조물과 유체의 경계면에서 다음과 같은 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{y=H_1} \quad (26)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (g + \ddot{u}_{gy})\eta = 0 \Big|_{y=H_1} \quad (27)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \Big|_{x=\pm L_x} \quad (28)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \Big|_{z=\pm L_z} \quad (30)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \ddot{u}_{gy}(H - y) = 0 \quad (31)$$

여기서, \ddot{u}_{gy} 는 y방향 지반 가속도를 나타낸다.

y방향 수직 지반운동을 받고 강제거동을 하는 구조물 내부 유체의 속도 potential은 x방향과 z방향으로 일정하므로 변수분리법을 사용하여 경계조건 식 (28), 식 (29), 식 (30)을 만족하는 Laplace 방정식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$\phi_r^v = const. \quad (32)$$

식 (32)로부터 y방향 수직 지반운동을 받을 때 구조물의 강제거동에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력과 유체 자유수면의 sloshing 높이를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$p_r^v = -\rho \ddot{u}_{gy}(H - y) \quad (33)$$

$$\eta_r^v = 0 \quad (34)$$

유체 저장 구조물이 y방향 수직 지반운동을 받을 때 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동에 대한 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건은 식 (14), (15), (16), (17), (18), (19)로 표현되나, x방향과 z방향에 대하여 대칭인 형상을 나타내므로 Laplace 방정식의 해는 다음과 같은 급수의 형태로 얻어진다.

$$\phi_f^v = \sum_{n=0}^{\infty} \cosh k_n x \cdot \cos k_n y \cdot q_{3n}^*(z, t) + \sum_{n=0}^{\infty} \cos k_n y \cdot \cosh k_n z \cdot q_{4n}^*(x, t) \quad (35)$$

이때 계수 $q_{3n}^*(z, t)$ 와 $q_{4n}^*(z, t)$ 는 다음과 같다.

$$q_{3n}^*(z, t) = \frac{\int_{-H}^H \dot{w}_x(y, z) \cdot \cos k_n y \, dy}{[k_n \cdot \sinh k_n L_x] / H} \quad (36)$$

$$q_{4n}^*(x, t) = \frac{\int_{-H}^H \dot{w}_z(y, z) \cdot \cos k_n y \, dy}{[k_n \cdot \sinh k_n L_z] / H} \quad (37)$$

따라서 y방향 수직 지반운동을 받을 때 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력과 유체 자유수면의 sloshing 높이는 다음과 같다.

$$p_f^v = -\rho \sum_{n=0}^{\infty} \cosh k_n x \cdot \cos k_n y \times \sum_i \ddot{r}_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(y, z) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right) / [k_n \cdot \sinh k_n L_x] / H - \rho \sum_{n=0}^{\infty} \cos k_n y \cdot \cosh k_n z \times \sum_i \ddot{r}_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(x, y) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right) / [k_n \cdot \sinh k_n L_z] / H \quad (38)$$

$$\eta_j^v = - \sum_{n=0}^{\infty} \cosh k_n L_x \cdot \sin k_n y \times \sum_i^{+H} r_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(y, z) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right) / [\sinh k_n L_x] / H - \sum_{n=0}^{\infty} \sin k_n y \cdot \cosh k_n L_z \times \sum_i^{+H} r_i(t) \left(\int_{-H}^{+H} \xi_i(x, y) \cdot \cos k_n y \cdot dy \right) / [\sinh k_n L_z] / H \quad (39)$$

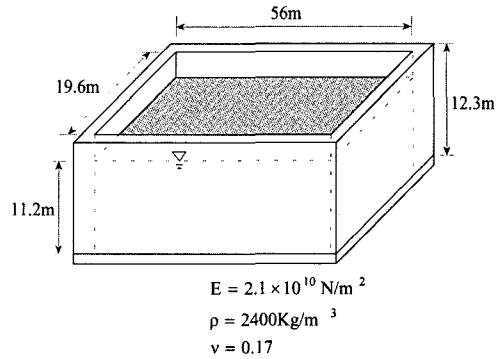


Fig. 2. Geometry and material properties of rectangular liquid storage structure

이때 식 (38), 식 (39)에서 사용된 구조물의 모드와 모드좌표는 수직 지반운동을 받는 경우의 것으로서 식 (23), 식 (24)에서 사용된 수평 지반운동에 대한 구조물의 모드와 모드좌표와는 다르다.

2.5. 수직 지반운동을 받는 구조물에서의 유체와 구조물의 상호작용 연계

수직 지반운동을 받는 경우 직사각형 유체 저장 구조물에서 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력은 구조물의 강제거동에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력 식 (33)과 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력 식 (38)의 합으로 표현되며, 이를 구조물의 운동방정식 식 (2)에 대입함으로써 유체-구조물 연계시스템의 이산화된 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$[M_n + M^{Av}] \{\ddot{r}\} + [C_n] \{\dot{r}\} + [K_n] \{r\} = -[r_n][E] \{\ddot{u}_g\} - [\xi]^T [L] \{p\}^v \quad (40)$$

식 (40)에서 수직 지반운동에 의한 유연한 구조물의 변형에 의해 발생하는 부가질량 M^{Av} 는 $[\xi]^T [L] [p_f]^v$ 으로부터 얻어진다. 식 (40)으로부터 수직 지반운동을 받는 유체 저장 구조물에서의 구조물 응답을 구할 수 있으며, 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력은 식 (33)과 식 (38)의 합으로부터, 유체 자유수면의 sloshing은 식 (39)로부터 얻어진다.

3. 해석예

본 논문에서 제안한 해석기법을 사용하여 Fig. 2와 같은 직사각형 유체 저장 구조물 해석모델에 대하여 유체-구조물 상호작용 해석을 수행하였다. 구

구조물 벽체의 두께는 1.2m이고, 구조물의 벽체는 각각 30(6×5)개의 판요소를 사용하여 모델링하였다. 일반적으로 물의 감쇠는 매우 작아 동적해석에서 무시된다. 구조물의 감쇠는 고려할 수 있으나, 감쇠를 고려할 경우 동적 응답이 감소하여 결과에 차이가 작아 감쇠를 무시하고 해석을 수행하였다. 유체 해석해의 무한급수는 100개 항을 사용하여 해석을 수행하였으며, 100개 이상의 항을 사용할 경우 해석 결과는 동일하였다. 수평 및 수직 입력지반운동으로는 1940년 Imperial valley 지진시 El Centro valley Irrigation District에서 계측된 N-S 방향 가속도 시간 이력을 사용하였으며, 최대가속도를 0.2g로 하였다.

3.1. 수평 지반운동을 받는 유체 저장 구조물에서의 유체-구조물 상호작용

본 논문에서 제안한 해석기법을 이용하여 직사각형 유체 저장 구조물이 x방향 수평 지반운동을 받을 때 유체-구조물 상호작용을 해석하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 구조물의 모드 갯수에 따른 구조물의 벽면 중앙에 작용하는 유체동압력의 최대값을 도시한 것이다. 결과에서 볼 수 있는 것과 같이 사용한 구조물의 모드 갯수가 증가함에 따라 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력이 증가하고 있다. 이러한 현상은 구조물 벽면의 가속도에서도 나타난다. 이는 유체동압력이 식 (23)과 같이 구조물의 가속도와 연계되어 있음으로써 나타나는 현상이다. 따라서 유체동압력의 정확한 산정을 위해서는 충분한 갯수의 구조물 모드가 해석에 사용되어야 한다. 또한 본 논문에서 제안한 방법에 의한 유체동압력의 분포를 경계요소-유한요소 연계법에 의한 결과³⁾와 비교하면 중앙부에서 2%, 바다 근처에서 3% 차이를 나타내고 있으나, 전체적으로 잘 일치하고 있다.

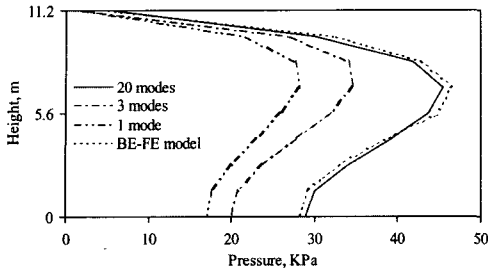


Fig. 3. Pressure distribution acting on the wall induced by horizontal excitation with respect to used structural modes

Fig. 4는 수평 지반운동이 작용할 때 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력의 각 성분들이 최대가 될 때의 분포를 도시한 것이다. 유체동압력의 대류 성분은 그림과 같이 hyperbolic 함수의 형태로 나타나고 있다. 반면에 유체동압력의 충격성분은 전체 유체동압력과 유사한 형태로 발생하고 있으며, 그 크기도 전체 유체동압력보다 크게 나타나고 있다. Fig. 5는 수평 지반운동이 작용할 때 유체동압력 성분들의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 대류성분의 최대값은 초기에 나타나고 있으며, 충격성분이 전체 유체동압력보다 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 충격성분과 대류성분이 반대방향으로 작용하고 있음을 보여주며, 정확한 해석을

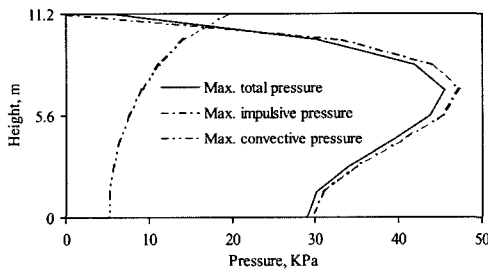


Fig. 4. Pressure distribution acting on the wall induced by horizontal excitation for each component

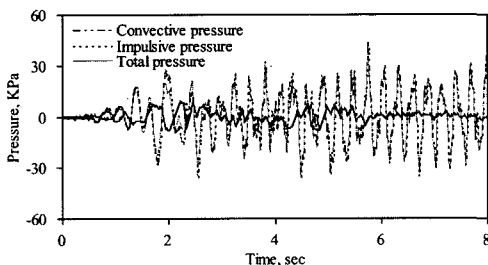


Fig. 5. Time histories of hydrodynamic pressure induced by horizontal excitation

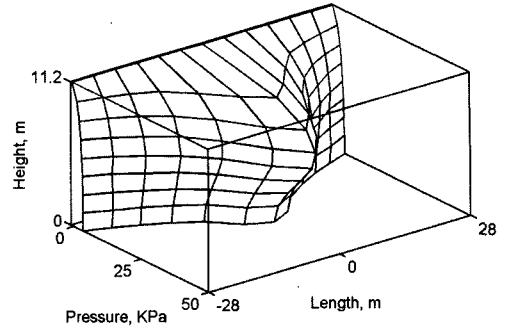


Fig. 6. Spatial hydrodynamic pressure distribution induced by horizontal excitation

위해서는 유체 sloshing을 반드시 고려해야함을 의미한다. Fig. 6은 Fig. 3과 동일한 시간에 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력의 공간적 분포를 도시한 것이다.

Fig. 7은 수평 지반운동에 의해 유연한 구조물의 벽면 중앙 상단에서 발생하는 변위의 시간이력을 도시한 것이고, Fig. 8은 구조물의 벽면 중앙에서 발생하는 유체·자유수면 sloshing 높이의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 유체동압력과는 달리 유체 자유수면의 sloshing은 식 (24)와 같이 구조물의 변위와 연계되어 있으므로써 구조물의 첫 번째 모드 가 전체 응답에서 지배적임을 볼 수 있다. 또한 경

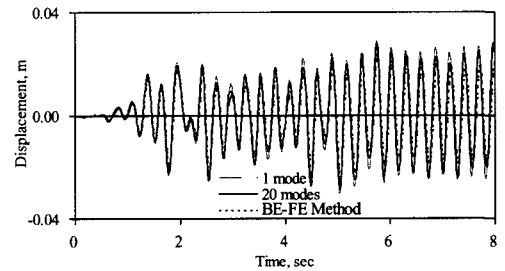


Fig. 7. Time histories of displacement at the top of the structure induced by horizontal excitation

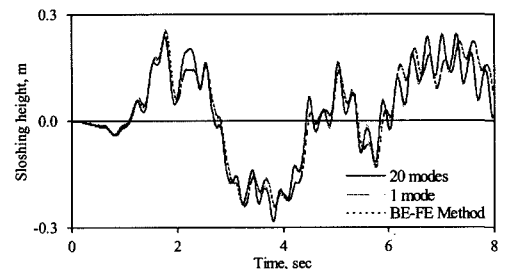


Fig. 8. Time histories of free surface sloshing motion induced by horizontal excitation

계요소-유한요소 연계법에 의한 결과와 비교하면 초기에는 잘 일치하고 있다. 후반으로 가면 다소의 차이를 보이나, 이는 구조물의 감쇠를 고려하고 경계요소-유한요소법의 모델링에 따른 변화를 고려하면 큰 차이는 없는 것으로 판단할 수 있다.

3.2. 수직 지반운동을 받는 유체 저장 구조물에서의 유체-구조물 상호작용

유연한 직사각형 유체 저장 구조물이 y방향 수직 지반운동을 받을 때 유체-구조물 상호작용을 본 논문에서 제안한 해석기법을 이용하여 해석하였다. Fig. 9는 해석에 사용된 구조물의 모드 갯수에 따른 구조물의 벽면 중앙에 작용하는 유체동압력의 최대 값을 도시한 것이다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 사용한 구조물의 모드 갯수가 증가함에 따라 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력이 증가하고 있다. 따라서 유체동압력의 정확한 산정을 위해서는 충분한 갯수의 구조물 모드가 해석에 사용되어야 할 것이다. 또한 본 논문에서 제안한 방법에 의한 유체동압력의 분포를 경계요소-유한요소 연계법에 의한 결과와 비교하면 전체적으로 잘 일치하고 있다. Fig. 10은 수직 지반운동이 작용할 때 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력의 각 성분들이 최대가 될 때의 분포를 도시한 것이다. 유연한 구조물의 변형에 의해 발생하는 유체동압력은 수평지반 운동을 받는 경우와 유사한 형태로 발생하고, 구조물의 강체거동에 의해 발생하는 유체동압력은 깊이에 비례하는 삼각형분포를 갖고 있으며 수평 지반운동을 받는 경우보다 전체 유체동압력에서 큰 비중을 차지하고 있다. Fig. 11은 Fig. 9과 동일한 시간에 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력의 공간적 분포를 도시한 것이다.

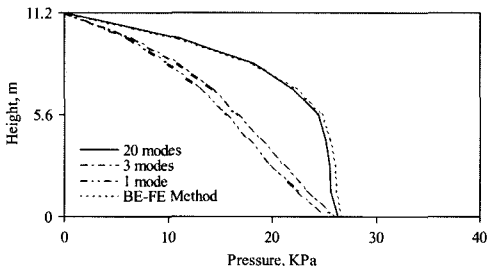


Fig. 9. Pressure distribution acting on the wall induced by vertical excitation with respect to used structural modes

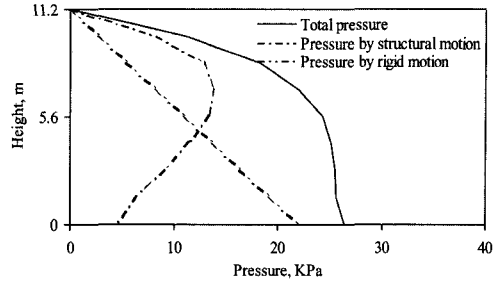


Fig. 10. Pressure distribution acting on the wall induced by vertical excitation for each component

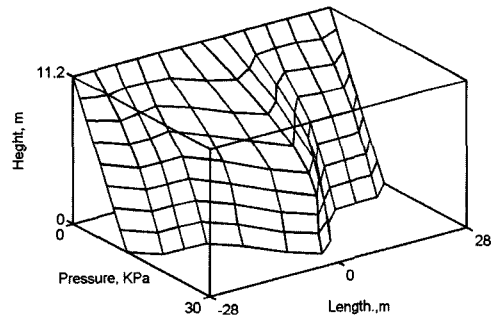


Fig. 11. Spatial hydrodynamic pressure distribution induced by vertical excitation

Fig. 12는 수직 지반운동에 의해 유연한 구조물의 벽면 중앙 상단에서 발생하는 변위의 시간이력을 도시한 것이고, Fig. 13은 구조물의 벽면 중앙에서 발생하는 유체 자유수면 높이의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 구조물에서 발생하는 변위나 유체 자유수면 높이는 구조물의 첫 번째 모드에 의한 응답이 전체 응답에서 지배적임을 볼 수 있으며, 수평 지반운동을 받는 경우에 비하여 그 크기가 작음을 볼 수 있다. 그리고 본 논문에서 제안한 방법에 의한 결과가 경계요소-유한요소 연계법에 의한 결과와 잘 일치하고 있다.

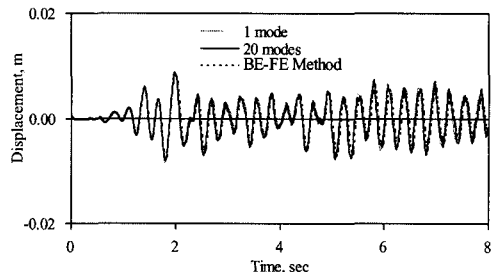


Fig. 12. Time histories of displacement at the top of the structure induced by vertical excitation

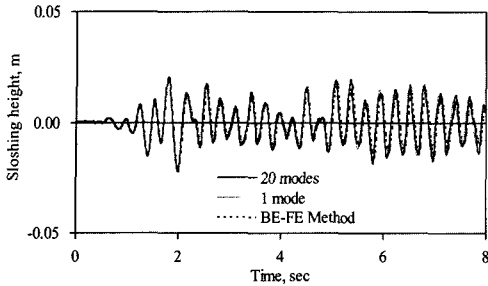


Fig. 13. Time histories of free surface sloshing motion induced by vertical excitation

4. 결 론

직사각형 유체 저장 구조물에서 유체-구조물 상호작용은 구조물의 강제거동에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력 성분과 유연한 구조물의 변형에 의한 유체의 유동에 의해 발생하는 유체동압력 성분을 모두 고려하여야 한다. 수치해석법의 경우 유체 자유수면의 sloshing이 고려된 해석을 수행할 수 있으나, 유체 자유수면의 sloshing이 모델링에 매우 민감하기 때문에 모델링에 많은 시간이 소요되며, 절점의 증가로 인하여 해석에 많은 시간이 소요되는 어려움이 있다. 반면 현재까지의 해석해를 이용한 방법들은 유체 자유수면 sloshing의 영향을 반영하지 못하여 정확한 해석으로 보기 힘들다. 본 논문에서는 수평 및 수직 지반운동을 받는 직사각형 유체 저장 구조물에서 유체 자유수면 sloshing을 고려한 유체 유동의 해석해를 구하고 이를 구조물의 유한요소와 연계함으로써 기존의 해석기법이 가지고 있는 문제점들을 해결하였다. 따라서 수치해석법에서 나타나는 요소의 크기에 따른 유체 자유수면의 민감성과 모델링 및 계산에 소요되는 시간의 증가를 제거하였고, 현재까지의 해석해를 이용한 방법들이 고려하지 못한 유체 자유수면 sloshing을 고려함으로써 sloshing을 고려한 유체-구조물 상호작용의 해석을 보다 간편하게 정확하게 수행할 수 있다.

본 논문에서 제안한 해석기법은 경계요소-유한요소 연계법에 의한 결과와의 비교를 통하여 해석기법의 타당성을 검증하였고 예제 해석을 통하여 직사각형 유체 저장 구조물에서 발생하는 응답의 특성을 파악하였다. 수평 지반운동이 작용할 때 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력은 hyperbolic 함수 형태의 대류성분과 구조물의 가속도와 연계된

충격성분의 합으로 나타나며, 입력 지진파의 특성에 따라 각 성분의 비중은 달라진다. 반면 유체 자유수면의 sloshing은 구조물의 변위와 연계되어 나타난다. 수직 지반운동이 작용할 때에는 구조물의 강제거동에 의해 발생하는 삼각형분포의 유체동압력 성분이 전체 유체동압력에서 큰 비중을 차지하며, 구조물의 변위와 유체 자유수면 sloshing은 상대적으로 작게 발생한다.

감사의 글 : 이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Housner, G. W., "Dynamic pressure on accelerated fluid containers," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 47, pp. 15~35, 1957.
- 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) 고현무, 김재관, 박정준, "구형 유체저장 구조물의 유체-구조물 상호작용에 관한 해석적 연구", *대한토목학회 논문집*, 제15권, pp. 765~775, 1995.
- 7) Fischer, F. D. and Seeber, R., "Dynamic response of vertically excited liquid storage tanks considering liquid-soil interaction", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16 pp. 329~

- 342, 1988.
- 8) Veletsos, A. S. and Tang, Y., "Dynamics of vertically excited liquid storage tanks," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, pp. 1228~1246, 1986.
- 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.