

Eulerian 기법을 이용한 유체저장구조물의 지진해석

Seismic Analysis of Liquid Storage Structures Using Eulerian Formulation

○ 윤 정방* 김 재민** 김 영석** 전 영선***
Yun, Chung-Bang Kim, Jae-Min Kim, Young-Surck Choun, Young-Sun

ABSTRACT

In this paper the liquid sloshing effects in rectangular liquid storage structures under earthquake loadings are studied. The study focuses on the investigation of the effect of the flexibility of the storage wall. The storage structure is modelled using beam elements. The motion of the liquid is expressed by the Laplace equation. The equation of motion is formulated including the coupling between the wall motion and the sloshing motion. Seismic analyses have been carried out utilizing the response spectra method.

1. 서 언

본 논문에서는 직사각형 유체 저장구조물의 지진 발생시의 거동을 해석할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 특히 지진 발생시 저장구조물 내부에서 유발될 유동과 구조물과의 동적 상호작용을 고려한 해석 방법을 개발하였다.

유체 저장구조물과 그 내부의 유동과의 상호작용에 대한 연구는 유류저장탱크, 유조선 등을 중심으로 많이 연구되어 왔다. 초기의 유체 저장구조물의 지진에 대한 거동해석은 구조물의 벽체를 유연성이 없는 강체로 가정하고 유체의 동적거동을 구하였다^[1]. 그러나, 1964년 발생한 알라스카 지진에 의해서 많은 유체저장구조물이 큰 피해를 입었다는 분석이 나온 후, 구조물의 유연성을 고려한 구조물-유체의 상호작용에 대한 연구가 많이 수행되어왔다^[2, 3, 4, 5].

본 논문에서는 직사각형 형태의 저장구조물에 대하여 유동의 대류성분까지 고려한 구조물-유체의 동적거동을 다루었다. 저장구조물의 유동해석을 위하여, 본 논문에서는 Eulerian 기법들 중에서, 유동의 영향을 편미분 방정식의 해로써 해석하는 방법을 사용하였다.

2. 구조물의 모형화

직사각형 유체저장구조물에 임의의 방향으로 작용되는 지진은 수직벽면에 직각인 성분과 이에 나란한 성분으로 분리해서 생각할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 벽면에 수직인 방향의 수평 지진성분만을 고려하였다. 또한, 저장조 내의 유동해석을 저장조의 바닥면 중앙점에 위치한 수직평면에 대하여 해석하였다(그림 1). 그 배경은 그 지점이 저장조의 벽체에서 가장 큰 지점이며, 지진발생시 벽면의 거동이 가장 클 것이며, 따라서 구조물-유체의 상관된 동적거동의 효과가 가장 클 것으로 판단되기 때문이다. 양쪽 벽체가 보(Beam)처럼 거동하며, 지진발생시 두 벽면이 수평방향으로 같이 거동한다고 가정하였다. 위의 가정에 따라서 직사각형 유체저장조 벽면구조를 단위폭(1m)을 가지는 보요소로 모형화 하였다. 벽체를 모형화한 보요소의 단면계수를 결정할 때는, 3차원 구조인 직사각형 저장구조물의 기본자유진동수가 보요소의 자유진동수와 같게 되도록 정하였다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수.

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정.

*** 한국원자력연구소 선임연구원.

3. 유동의 산정

유체 저장구조물에서 벽면의 거동에 의한 내부 유체의 유동해석은, 속도포텐셜을 구함으로써 수행될 수 있다. 유체가 균일하고, 비점성, 비압축성, 비회전유동 이라고 가정할 때, 저장조 내에서 유동의 속도포텐셜은 다음과 같은 Laplace 방정식을 만족시킨다.

$$\nabla^2 \phi(x, z, t) = 0 \quad (1)$$

윗식은 유체의 연속조건을 나타내는 연속방정식으로서, $\phi(x, z, t)$ 는 속도포텐셜이다. 유동에 의한 압력은 앞의 가정들과 Navier-Stokes 방정식에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 p 는 유동압, ρ 는 유체의 밀도이다.

유동에 의한 유체의 변위가 작다면, 직사각형 저장조내 유동의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x}(\pm L, z, t) = \dot{u}(z, t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z}(x, 0, t) = 0 \quad (4)$$

$$\rho \dot{\phi}(x, H, t) + \rho g \xi(x, t) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z}(x, H, t) = \dot{\xi}(x, t) \quad (6)$$

윗식에서 $u(z, t)$ 는 벽체구조물의 수평변위로서, 앞의 가정에 의해 수직공간좌표(z)와 시간(t)의 함수이고, g 는 중력가속도이다. 그리고 $\xi(x, t)$ 는 유체의 자유표면에서의 파의 높이를 나타낸다. 위의 조건들을 요약하면 그림 2 와 같다.

지배방정식(1)과 경계조건식 (3)에서 (6)을 만족하는 속도포텐셜을 구하기 위하여, 먼저 식(1)과 식(3)를 만족하는 속도포텐셜을 구하면 다음과 같다.

$$\phi(x, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(z, t) \sin \lambda_n x + x \dot{u}(z, t) \quad (7)$$

여기서 $\lambda_n = (2n-1)\pi/(2L)$ 이고, $n=1, 2, \dots$ 이다. 위의 식(7)에서 첫번째항은 식 (3)에서 오른쪽항이 0(영)인 homogeneous 경계조건에 대한 해로서 $A_n(z, t)$ 는 미지의 양이며, 두번째항은 식 (3)을 만족하는 nonhomogeneous 경계조건에 대한 해 중에서 가장 기본적인 해이다.

이제 식(7)을 식(1)에 대입하여 미지량 $A_n(z, t)$ 에 대한 방정식을 구하기 위하여 식(7)의 두번째항에서의 x 를 $\sin \lambda_n x$ 의 항으로 전개한 결과를 이용하여 다음의 식(8)과 같이 변형하였다.

$$\phi(x, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \{A_n(z, t) + b_n \dot{u}(z, t)\} \sin \lambda_n x \quad (8)$$

여기서, b_n 은 x 에 대한 sine급수의 계수로서 $b_n = (-1)^{n-1}(8L)/\{(2n-1)^2\pi^2\}$ 이다[6]. 식(7)과 (8)를 식(1)에 대입하여 정리하면, 다음과 같이 $A_n(z, t)$ 에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 A_n}{\partial z^2}(z, t) - \lambda_n^2 A_n(z, t) = -b_n \frac{\partial^2 \dot{u}}{\partial z^2}(z, t) \quad (9)$$

식(8)과 자유표면에서의 경계조건식 (5)와 (6)으로부터 자유표면거동 $\xi(x, t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

$$\xi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t) \sin \lambda_n x \quad (10)$$

여기서 $\eta_n(t)$ 는 유체의 자유표면거동과 관련항 미지의 양이다. 이제 미지의 양 $A_n(z, t)$ 은 $z=0$ 와 $z=H$ 에서의 경계조건식을 사용하여 구해야 하는데, 식(8)을 주어진 경계조건식 (4),(5)와 (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial A_n}{\partial z}(0, t) + b_n \frac{\partial \dot{u}}{\partial z}(0, t) = 0 \quad (4')$$

$$A_n(H, t) + b_n \dot{u}(H, t) + g \eta_n(t) = 0 \quad (5')$$

$$\frac{\partial A_n}{\partial z}(H, t) + b_n \frac{\partial \dot{u}}{\partial z}(H, t) = \dot{\eta}_n(t) \quad (6')$$

이제 식(1)과 경계조건식 (3)~(6)이, 식(9)와 경계조건(4')~(6')으로 바뀌었다. 미분방정식 (9)의 해는 벽면을 유한요소법을 이용해서 모형화했을 때, 절점변위의 함수로 나타낼 수 있다. 이때 정확한 해를 구하기 위해서는 벽면을 여러개의 요소로 나눈후, 각요소의 변위를 나타내는 형상함수로 부터 구할 수 있다. 그러나, 이 과정은 상당히 복잡하고 비효율적이며 실제적인 방법이 아니다. 이는 통상 유동의 주파수 특성이 구조물의 기본진동주파수보다 훨씬 작아서 유동이 구조물의 기본이 되는 수개의 저 주파수 진동모우드에 주로 영향을 받기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 식(9)의 해를 구하기 위하여, 벽면에서의 유동의 수평변위를 다음과 같이 자유표면 이하의 전 구간에 ($0 \leq z \leq H$)에 걸쳐 정의되는 다항식으로 근사화하였다.

$$u(z, t) \approx \{P(z)\}^T \{C(t)\} \quad (11)$$

여기서 $\{P(z)\}$ 는 다항식 벡터로서, 본 논문에서는 3차식 까지 사용하였으며, $\{C(t)\}$ 는 다항식의 계수로서, 벽면거동에 관련된 시간의 함수이며, 다음의 식(12)와 같이 벽면의 절점변위의 선형조합으로 나타낼 수 있다.

$$\{C(t)\} \approx \{R\} \{d(t)\} \quad (12)$$

위의 식(12)에서 행렬 $[R]$ 은 유체와 접하는 벽면을 1개의 요소로 모형화 할 때는 직접 구할 수

있으며, 여러개의 요소로 모형화 할 때는 최소화 승기법 등을 이용해서 근사적으로 결정할 수 있다.[5]

미분방정식 식(9)의 일반해는, 식(9)에서 오른 쪽 항이 0일때의 해와, 식(11)에 나타난 벽면의 변위를 대입해서 구한 해의 합이다.

$$A_n(z, t) = B_{n1}(t) \cosh \lambda_n z + B_{n2}(t) \sinh \lambda_n z + \frac{2b_n}{\lambda_n^2} \dot{C}_2(t) + \frac{6b_n}{\lambda_n^2} \dot{C}_3(t) z \quad (13)$$

윗식에서 $B_{n1}(t)$ 과 $B_{n2}(t)$ 는 경계조건식 (4')과 (5')을 이용해서 구할 수 있다. 이 때 경계조건식 (5')은 다음과 같이 시간(t)에 대해 적분한 형태를 사용하면 편리하다.

$$A_n(H, t) = -b_n \dot{u}(H, t) - g \int_0^t \eta_n(\tau) d\tau \quad (5'')$$

이렇게 구한 $A_n(z, t)$ 을 식(8)에 대입하면, 유동의 속도포텐셜은 다음과 같이 2개의 항으로 분리해서 나타낼 수 있다.

$$\phi(x, z; t) = \phi_1(x, z, \{\dot{d}\}) + \phi_c(x, z, \int_0^t \{\eta(\tau)\} d\tau) \quad (14)$$

윗식에서 ϕ_1 는 벽면거동 $\{d(t)\}$ 에만 관련된 유동의 충격(impulsive)성분이며, ϕ_c 는 자유표면거동 $\{\eta(t)\}$ 에 관련된 유동의 대류(convective)성분을 나타낸다.

4. 구조물-유체 상관계의 운동 방정식

앞의 3 절에서 사용하지 않은 경계조건식 (6')을 시간에 대하여 미분한 후, 이에 식(13)의 $A_n(z, t)$ 를 대입하면 다음과 같이 자유표면거동 $\{\eta\}$ 에 대한 식이 벽면의 절대가속도 $\{\dot{d}(t)\}$ 에 의한 운동 방정식의 형태로 구해진다.

$$[M_f] \{\ddot{\eta}\} + [K_f] \{\eta\} = [S] \{\ddot{d}\} \quad (15)$$

위의 식(15)에서 $[M_f]$ 와 $[K_f]$ 는 대각행렬로서, 각각 자유표면의 거동과 관련된 유동의 질량행렬과 강성행렬로 생각할 수 있고, $[S]$ 는 벽면가속도와 관련된 가진력의 하중계수로 생각할 수 있다. 식 (15)에서 $[M_f]$ 와 $[K_f]$ 는 대각행렬이므로, 자유표면거동 $\{\eta\}$ 의 자유진동주파수(sloshing frequency)는 벽면이 강제인 경우의 Housner 의 결과와 같다[6].

식 (14)에 나타난 속도포텐셜로부터 벽면에 작용하는 유동 압력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{x=L} = -\rho \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \Big|_{x=L} - \rho \frac{\partial \phi_c}{\partial t} \Big|_{x=L} \quad (16)$$

또한 위의 압력분포로부터, 벽체의 절점하중은

가상일의 원리를 이용하여 구조물의 절점하중으로 표현하면 다음과 같다.

$$\{F\} = -[M_a] \{\ddot{d}\} - [S]^T \{\eta\} \quad (17)$$

윗식에서 $[M_a]$ 는 대칭행렬이며, 벽면운동과 관련된 내부유체의 영향 즉, 부가질량으로 볼 수 있고, $[S]$ 는 자유표면의 거동이 벽체구조의 절점하중에 미치는 영향을 나타내는 행렬로서 식(15)의 $[S]$ 와 같다[6].

벽면의 거동에 관련한 부분과 유체의 자유표면에서의 거동과 관련된 부분의 운동 방정식을 조합하면 다음과 같이 벽면의 거동과 자유표면의 거동이 상관된(coupled) 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_s + M_a & 0 \\ -S & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d} \\ \ddot{\eta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & S^T \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d \\ \eta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

윗식에서 $[M_s]$ 와 $[K_s]$ 는 각각 구조물의 질량행렬과 강성행렬이며, $[M_a]$ 와 $[S]$ 는 앞의 식 (17)에서 정의된 수평방향의 절점하중에 대한 계수행렬이다.

벽면의 절점변위를 바닥면에서의 절대수평변위 벡터 $\{d_b\}$ 와 자유절점에서의 절대변위벡터 $\{d\}$ 로 나누어서 식(18)를 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & M_b^T & 0 \\ M_b & M & 0 \\ -S_b & S & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_b \\ \ddot{d} \\ \ddot{\eta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_b^T & S_b^T \\ K_b & K & S^T \\ 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_b \\ d \\ \eta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_e \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (19)$$

여기서 $\{R_e\}$ 는 바닥면에서의 반력이다.

자유진동의 경우, 앞의 식(19)에서 $\{\ddot{d}_b\} = \{d_b\} = \{0\}$ 이며, 0(영)이 아닌 나머지 구조물의 절대변위벡터 $\{d\}$ 와 유체의 자유표면거동의 영향을 나타내는 벡터 $\{\eta\}$ 에 대한 구조물-유체 상관계의 계수행렬은 벽면거동과 자유수면의 거동과의 상호작용에 대한 행렬 $[S]$ 가 존재함으로 인하여, 대칭이 아님을 알 수 있다. 이처럼 대칭이 아닌 계수행렬로부터, 모우드중첩법을 사용하여 동적 해석을 하는데 필요한 고유진동수와 고유진동벡터를 구하는 것은 매우 어렵다. 이러한 어려움을 피하기 위하여 계수행렬 $[S]$ 를 무시하고 해석하거나[2, 3], 대칭인 계수행렬을 가지는 좌표계로 변환하여 동적해석을 하는 방법[4, 5] 등이 사용되고 있다. 본 논문에서는 유체의 자유표면거동의 영향까지 고려할 수 있는 후자의 방법을 사용하기로 한다. 그 방법은 다음과 같다.

식(19)의 양변에 아래의 식(20)과 같이 행렬 [T]를 곱하면,

$$[T] = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & KM^{-1} & 0 \\ 0 & SM^{-1} & I \end{bmatrix} \quad (20)$$

식(21)과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & M_b^T & 0 \\ KM^{-1}M_b & K & 0 \\ SM^{-1}M_b - S_b & 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_b \\ \ddot{d} \\ \ddot{\eta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_b^T & S_b^T \\ KM^{-1}K_b & KM^{-1}K & KM^{-1}S^T \\ SM^{-1}K_b & SM^{-1}K & K_f + SM^{-1}S^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_b \\ d \\ \eta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_e \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

위의 식 (21)에서 $\{d\}$ 와 $\{\eta\}$ 에 관련한 구조물-유체 상관계의 계수행렬은 대칭이며, 이로 부터 자유진동해석은 쉽게 수행될 수 있다. 자유진동해석을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[\widehat{K}]\{\phi_i\} - \omega_i^2[\widehat{M}]\{\phi_i\} = \{0\} \quad (22)$$

여기서,

$$[\widehat{M}] = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & M_f \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$[\widehat{K}] = \begin{bmatrix} KM^{-1}K & KM^{-1}S^T \\ SM^{-1}K & K_f + SM^{-1}S^T \end{bmatrix}$$

이고, ω_i 는 i -번째 자유진동수이며, $\{\phi_i\}$ 는 i -번째 자유진동모우드이다.

5. 지진 해석

지진하중에 대한 해석을 위하여 자유절점에서의 절대변위벡터 $\{d\}$ 를 지진에 의한 지점에서의 변위벡터 $\{d_b\}$ 와 이에 대한 상대변위성분 $\{d_r\}$ 의 항으로 분리해서 나타내면 다음과 같다.

$$\{d_b\} = \{J_1\}x_g \quad (24)$$

$$\{d\} = \{J_2\}x_g + \{d_r\} \quad (25)$$

여기서 x_g 는 지반의 수평변위이고, $\{J_1\}$ 과 $\{J_2\}$ 는 각각 구조물의 지점과 자유절점에서의 변위와 지반운동과의 상관관계를 나타내는 벡터로서, 수평성분 변위에 대하여는 1 이고 나머지는 0 인 벡터이다.

지진에 의하여 지점의 절대위치는 시간에 따라 변하게 되지만, 지점의 변위 $\{d_b\}$ 만에 의한 전체 구조물에서 내부변형에너지는 0이므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$[K_b]\{J_1\} + [K]\{J_2\} = \{0\} \quad (26)$$

이제, 식(24),(25)와 (26)을 식(21)에 대입하고 2열과 3열만을 정리하면 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$[\widehat{M}]\{\ddot{U}\} + [\widehat{K}]\{U\} = -\{M_e\}\ddot{x}_g \quad (27)$$

여기서 $\{U\} = \langle d_r, \eta \rangle^T$ 이고,

$$\{M_e\} = \begin{bmatrix} KM^{-1}M_b & K \\ SM^{-1}M_b - S_b & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{Bmatrix} \quad (28)$$

식 (27)로 부터는 자유표면거동과 벽면의 거동간의 상호작용이 고려된 자유진동해석이 용이하며, 모우드중첩법과 지진응답스펙트럼해법을 이용하면 지진에 대한 $\{d_r\}$ 와 $\{\eta\}$ 의 해를 쉽게 구할 수 있다.

6. 예제 해석 및 결과 분석

지진에 의한 유동의 영향을 알아보기 위하여 개발된 해법을 사용하여 3가지 경우의 저장조에 대하여 수치적인 계산을 하였다. 그리고 자유수면의 거동이 벽면의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 식(22)에서의 계수행렬 [S]를 고려한 경우와 고려하지 않는 두가지 경우의 자유진동수를 비교하였다. 벽체와 유체의 재료상수값은, 구조물의 경우 밀도 $\rho = 2.4 \text{ ton/m}^3$, 탄성계수(E) = $2.0 \times 10^6 \text{ ton/m}^2$, 보요소(폭:1m)의 단면이차모멘트(I) = 0.313 m^4 을 사용하였고, 물의 밀도는 1.0 ton/m^3 을 사용하였다.

유동에 의한 구조물-유체 상관계에서 구조물의 자유진동 특성과, 유체의 자유표면거동이 벽면의 거동에 미치는 영향을 각각 알아보기 위하여, 각각의 경우에 대한 자유진동 해석을 하였으며, 그 결과는 표 1 에 나타내었다. 저장조의 길이가 각각 60m, 30m 와 12m 일 때, 자유수면거동의 첫 번째 고유진동수는 각각 0.088 Hz, 0.151 Hz 와 0.254 Hz 로서, 이는 제 3 절에서 언급한 바와 같이 강제벽면에 대한 Housner의 값과 같다. 벽체구조만의 첫 번째 고유진동수는 4.2 Hz 이며, 구조물-유체 상관계에서 구조물과 관련한 첫 번째 고유진동수는 저장조의 길이 60m, 30m와 12m인 경우에 각각 3.3 Hz, 3.2 Hz 와 3.3 Hz 로 거의 같은 값이다. 유동의 충격성분에 의한 부가질량으로 인하여 구조물-유체 상관계의 자유진동수는 구조물만의 자유진동수에 비하여 상당히 작아짐을 알 수 있다. 그러나 유체 표면거동의 영향을 포함한 구조물-유체 상관계(coupled case)에서 구조물과 관련한 자유진동수와, 이를 포함시키지 않은 경우(uncoupled case)의 구조물과 관련한 자유진동수와의 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 지금까지의 유사한 연구결과와 일치하는 결과이다[2, 4, 5].

유동에 의한 한쪽 벽체저부에서의 전단력과 휨 모멘트를 구하였으며, 그 결과를 표 2 와 표 3 에 요약하였다. 이 때 입력지진은 최대지반가속도가 0.2g이고, 감쇠비가 0.5 % 인 U.S. NRC Regulatory Guide 1.6 의 설계응답스펙트럼^[1]을 사용하였다. 일차적으로 본 논문에서 개발한 방법의 타당성을 알아보기 위하여, 벽면이 강체인 경우에 대하여 구한 전단력과 모멘트를 Housner의 방법에 의한 결과와 비교하였다. 표 2 에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 개발한 방법에 의한 전단력과 모멘트는 벽면이 강체인 경우에 대한 Housner의 결과와 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다.

구조물의 벽면 유연성을 고려하여 유동을 구한 결과는, 표 3 에 보인바와 같이, 대류성분의 경우 벽면이 강체인 경우와 거의 차이가 없지만, 충격성분의 경우 벽체저면에서의 전단력과 모멘트는 2.5~3.0배 정도 큰값을 나타낸다. 이는 구조물의 유연성에 따른 구조계의 자유진동특성 때문에, 벽체에 작용되는 지진하중이 증폭되기 때문이다.

결론적으로 구조물-유체 상관계의 동력학적 해석을 할 때, 충격성분의 경우는 벽체의 유연성을 고려하지 않으면, 유동이 벽면에 작용하는 하중을 불합리하게 작게 산정하므로 벽체의 유연성을 반드시 고려하여 해석하여야 함을 알 수 있었다. 그리고 대류성분은 벽체의 유연성에 의한 영향이 매우 작으므로, 해석의 편의상 유체의 자유수면 거동의 영향이 벽면의 거동에 미치는 영향을 무시하고 해석하여도 무방함을 보이고있다.

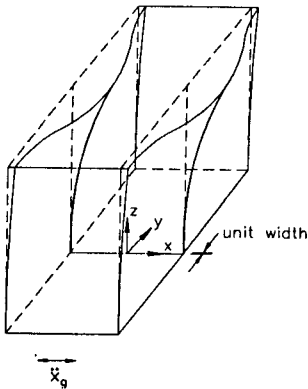


그림 1. 벽체의 모형화

참고문헌

1. George W. Housner, "Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Container", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.47, No.1, Jan., 1957, pp.15-35.
2. Medhat A. Haroun, "Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.11, 1983, pp.179-206.
3. Medhat A. Haroun, "Stress Analysis of Rectangular Walls under Seismically Induced Hydrodynamic Loads", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.74, No.3, June 1984, pp.1031-1041.
4. D. Fischer, "Dynamic Fluid Effects in Liquid-Fluid Flexible Cylindrical Tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.7, 1979, pp.587-601.
5. 윤정방, 이창근, "벽면의 유연성을 고려한 액체 저장탱크의 동적해석", 대한토목학회 논문집, 제7권 제4호, 1987, pp.21-29.
6. 윤정방, 이동근, 김영석, 김재민, "사용후 핵연료 저장구조물의 유체-구조물 상호작용해석방법의 개발", 연구보고서, 한국과학기술원 토목공학과, 1991.

감사의 글

본 논문은 방사성폐기물 관련기금의 지원으로 수행된 연구결과의 일부이다. 동 기금의 지원에 깊은 감사를 뜻을 표한다.

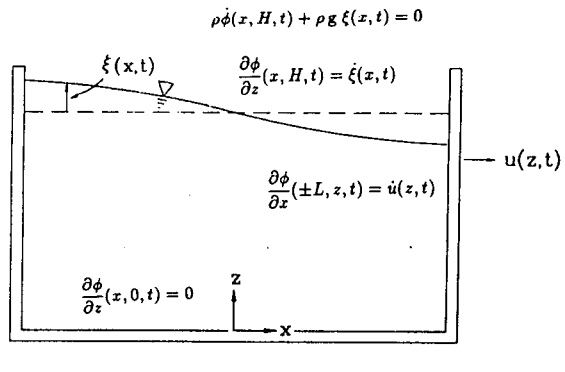


그림 2. 수평지진에 대한 유동의 경계조건

표 1. 자유진동 해석 : 구조물의 자유진동수 (단위 : Hz)

Mode No.	구조물만의 자유진동수	구조물-유체 상관계의 자유진동수					
		저장조 길이 60m		저장조 길이 30m		저장조 길이 12m	
		coupled	uncoupled	coupled	uncoupled	coupled	uncoupled
1	4.2	3.3	3.3	3.2	3.2	3.3	3.3
2	36.0	27.4	27.4	27.3	27.3	28.4	28.4
3	644.9	618.3	618.3	614.5	614.5	614.0	614.0
4	5922.2	5884.6	5884.6	5878.1	5878.1	5875.5	5875.5

※ 위의 표 1 에서 coupled 란 유체의 자유표면거동의 영향을 포함한 경우를 의미하고 uncoupled는 이를 포함하지 않는 경우이다.

표 2. 유동압에 의한 벽면 바닥의 최대전단력 (단위 : ton)

저장조의 길이	Rigid Wall						Flexible Wall		
	Housner			본 연구			본 연구		
	대류	충격	합*	대류	충격	합*	대류	충격	합*
60 m	11.1	19.9	22.8	12.2	16.8	20.8	12.2	55.7	57.0
30 m	9.2	19.1	21.2	9.2	16.7	19.1	9.2	55.4	56.2
12 m	3.4	13.0	13.4	3.3	11.4	11.9	3.4	36.6	36.8

* SRSS 방법에 의하여 조합한 것임.

표 3. 유동압에 의한 벽면 바닥에서의 최대모멘트 (단위 : ton-m)

저장조의 길이	Rigid Wall						Flexible Wall		
	Housner			본 연구			본 연구		
	대류	충격	합*	대류	충격	합*	대류	충격	합*
60 m	80.0	98.1	126.6	82.7	86.1	119.8	82.7	340.2	350.1
30 m	70.8	94.4	118.0	68.0	86.5	110.0	68.2	349.5	356.1
12 m	33.5	64.4	72.6	31.6	62.1	69.7	31.8	257.3	259.3

* SRSS 방법에 의하여 조합한 것임.