

면진된 유체저장탱크의 비선형 유체-구조물 상호작용 해석
Analysis of Fluid-Structure Interactions
Considering Nonlinear Free Surface Condition
for Base-isolated Fluid Storage Tank

김문겸* 임윤목** 조경환*** 정승원**** 어준*****
Kim, Moon Kyum Lim, Yun Mook Cho, Kyung Hwan Jung, Sung Won Eo, Jun

ABSTRACT

A fluid-structure-isolator interaction program was developed in this study. The behavior of liquid regions are simulated by the boundary element method, and then the technique of analyzing the free surface motion in time domain is developed by using the nonlinear free surface boundary condition(NFBC) and the condition of interface between the structure and the fluid. Structure regions are modeled by the finite element method. In order to construct the governing equation of the fluid structure interaction(FSI)problem in time domain, the finite elements for a structure and boundary elements for liquid are coupled using the equilibrium condition, the compatibility condition and NFBC. The isolator is simulated by equation proposed in 3D Basis Me. In order to verify the validity and the applicability of the developed fluid-structure-Isolator interaction program, The horizontal forced vibration analysis was performed. The applicability of the developed method is verified through the artificial seismic analysis of real size liquid storage tank.

1. 서 론

유체저장 구조물에 지진과 같은 동하중이 작용하게 되면 구조물 내부의 유체에 동수압이 발생하게 되며 이는 구조물의 응답에 영향을 주고 변화된 구조물의 응답은 다시 내부의 유체에 영향을 주는 상호작용을 하게 된다. 이러한 유체-구조물 상호작용 시 유체 표면에서는 자유수면의 sloshing 현상이 발생하게 되며, 특히 장주기 특성을 지닌 지진파가 전달되거나 면진장치 등의 도입으로 인해 구조물 상부로 전달되는 지진파가 장주기의 특성을 가지게 될 경우 증폭된 sloshing

* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부, 교수
** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부, 부교수
*** 학생회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사과정
**** 연세대학교 사회환경시스템공학부, 석사
***** 대림산업주식회사, 사원

변위로 인해 roof-벽체 연결부에 예기치 않은 충격압이 발생하거나 내부유체가 유출되는 상황이 야기될 수 있다. 자유수면의 미소변위를 가정한 기존의 해석기법들은 해석절차를 간편하게 할 수 있는 장점이 있는 반면 유체의 대변형과 이로 인한 충격하중 그리고 구조물의 응답을 정확히 산정할 수 없다. 따라서, 유체-구조물 상호작용 거동을 정확하게 파악하기 위해서는 유체의 비선형 자유수면 경계조건을 고려한 해석이 요구된다. 본 연구에서는 자유수면의 비선형 경계조건을 고려한 유체-구조물-면진장치 시스템의 상호작용 해석기법을 개발하였으며 이를 통해 지진하중에 대한 시간영역해석을 수행하여 면진장치를 포함한 유체저장 구조물의 동적 거동 특성을 파악하였다.

2. 유체 및 구조물의 모형화

2.1 유체영역의 모형화

구조물 내의 유체가 비점성, 비압축성 이상유체로서 비회전 운동을 한다고 가정하면 $\nabla^2 \phi(\mathbf{x}, t) = 0$ 로 표현되며, Lagrange-Green Identity로부터 유체의 경계적분방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$c(\xi, t)\phi(\xi, t) = \int_{\Gamma} \phi^*(\xi, \mathbf{x}, t) \frac{\partial \phi(\xi, t)}{\partial \mathbf{n}} d\Gamma - \int_{\Gamma} \frac{\partial \phi^*(\xi, \mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{n}} \phi(\xi, t) d\Gamma \quad (1)$$

여기서 Γ 는 유체의 경계, \mathbf{n} 은 경계면에서의 외향법선, ξ 는 단위하중 작용점, \mathbf{x} 는 응답점을 나타내며 $\phi^*(\xi, \mathbf{x}, t)$ 는 Laplace 방정식의 기본해이다.

지배방정식의 경계적분방정식을 수치적분하기 위해서 경계적분경로를 경계요소와 경계절점으로 이산화하면 식 (2)와 같이 이산화된 경계적분방정식으로 나타낼 수 있고 이를 다시 간단한 형태의 행렬식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$[c]^i \{\phi\}^i + \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} \left[\frac{\partial \phi^*}{\partial \mathbf{n}} \right] [\phi] d\Gamma \right\} \{\phi\}^j = \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} [\phi^*] [\phi] d\Gamma \right\} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} \right\}^j \quad (2)$$

$$\mathbf{H} \phi = \mathbf{G} \phi, \mathbf{n} \quad (3)$$

지진과 같은 동하중이 작용하는 원통형 유체저장 탱크의 자유수면 거동은 자유수면에 작용하는 압력은 대기압과 같다는 동역학적 경계조건과 자유수면에 놓여진 유체 입자는 유체가 운동하는 동안 자유수면상에 위치해야 한다는 운동학적 경계조건을 만족해야 한다. 자유수면의 동역학적 경계조건과 운동학적 경계조건을 나타낸 식이 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \phi \nabla \phi + g\eta(x, y, t) = 0 \quad ; \text{ 자유수면의 동역학적 경계조건} \quad (4)$$

$$\frac{D\mathbf{x}_f}{Dt} = \nabla \phi \quad ; \text{ 자유수면의 운동학적 경계조건} \quad (5)$$

구조물 벽체와 유체가 접하는 경계(S_2)에서는 유속의 법선방향 성분과 구조물 벽체의 법선방향 속도가 같으며 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{n}} = v_n(t) \quad ; \quad \text{구조물 벽체와 유체의 경계면} \quad (6)$$

여기서 $v_n(t)$ 은 구조물 벽체의 법선방향 유속의 성분이다. 구조물 벽체에 작용하는 동수압은 Bernoulli의 식 (7)로부터 식 (8)과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \frac{P(\mathbf{x}, t)}{\rho_l} + \frac{1}{2} \nabla \phi \nabla \phi + g \eta(x, y, t) = F(t) \quad (7)$$

$$P(x, t) = -\rho_l \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho_l \nabla \phi \nabla \phi \quad ; \quad \text{구조물 벽면의 동수압} \quad (8)$$

유체영역의 경계요소는 지배방정식인 식 (1) 과 비선형 경계조건인 식 (4)와 식 (5)에 의해 수식화하여 모형화한다.

2.2 구조물 영역의 모형화

면진장치가 포함된 유체 저장구조물의 해석에 있어서 유체와 구조물간의 상호작용에 영향을 주는 구조물의 유연성을 반영하기 위해 구조물 영역을 모형화 한다.

$$\begin{aligned} (\delta \mathbf{d})^T & \left[\int_e \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV + \int_e \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \ddot{\mathbf{d}} + \int_e \kappa_d \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \dot{\mathbf{d}} \right. \\ & \left. - \int_e \mathbf{N}^T \mathbf{F} dV - \left[\mathbf{N}^T \boldsymbol{\Phi} dS - \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $\bar{\mathbf{N}}$ 는 절점 자유도와 공간에 관한 함수이며, \mathbf{d} 는 오직 시간만의 함수이다. \mathbf{F} 는 물체력이며, $\boldsymbol{\Phi}$ 은 가해진 표면력, \mathbf{p}_i 은 요소에 대해 총 n 개의 절점에 가해진 집중하중, ρ 는 물체의 밀도, κ_d 는 점성과 비슷한 물체의 감쇠상수이다. 적분은 요소의 체적 V_e 에 대해 행해진다. 또한, \mathbf{d} , $\dot{\mathbf{d}}$, $\ddot{\mathbf{d}}$ 는 절점의 변위, 속도, 가속도를 나타낸다. 가상변위 $\delta \mathbf{d}$ 는 임의의 값이므로, 식 (11) 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{R}^{ext} \quad (12)$$

$$\text{여기서, } \mathbf{m} = \int_e \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV, \quad \mathbf{c} = \int_e \kappa_d \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV, \quad \mathbf{k} \mathbf{d} = \int_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV$$

3. 유체-구조물-면진장치 상호작용 해석 기법 개발

이산화한 유체영역의 지배방정식을 시간영역에서 해석하기 위하여 식 (3) 의 절점들을 유체 자유수면 부분, 구조물 벽체와 유체경계면 부분, 그리고 구조물 바닥면과 유체경계면 부분으로 분리하고 경계조건을 적용하면 다음과 같이 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} H_{\eta\eta} & H_{\eta p} \\ H_{p\eta} & H_{pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho A + \rho g \eta \\ P_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{\eta\eta} & G_{\eta p} \\ G_{p\eta} & G_{pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\eta} \\ \mathbf{n} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_p \end{Bmatrix} \quad (13)$$

여기서, 아래첨자 η 와 P 는 각각 자유수면부의 절점, 구조물과 유체의 경계부분 절점을 가리킨다.

또한, $\dot{\boldsymbol{\eta}}$ 와 $\ddot{\boldsymbol{\eta}}$ 은 각각 슬러싱 변위벡터와 슬러싱 가속도벡터를 가리키고, $\ddot{\mathbf{u}}$ 와 \mathbf{P} 는 각각 구조물과 유체 경계의 가속도벡터와 동수압벡터를 가리킨다. \mathbf{n} 는 외향법선벡터를 가리키며, \mathbf{A} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2}(v_1^2 + v_2^2 + v_3^2) \quad (14)$$

또한, 식 (12)로부터 지진하중을 받는 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}^s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}^s \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}^s \mathbf{u} = -\mathbf{M}^s \mathbf{r} \ddot{\mathbf{u}}_g(t) + \mathbf{f}(t) \quad (15)$$

여기서, \mathbf{M}^s , \mathbf{C}^s , 그리고 \mathbf{K}^s 는 각각 구조물의 질량행렬, Rayleigh 감쇠행렬, 그리고 강성행렬이다. 또한, \mathbf{u} 와 $\ddot{\mathbf{u}}_g$ 는 각각 시간영역의 구조물의 변위벡터와 지반가속도 벡터를 나타낸다. \mathbf{r} 은 각각의 자유도를 지반운동에 연결하는 변형벡터이며, $\mathbf{f}(t)$ 는 동하중에 의해 생성된 유압의 등가 절점하중이다. 구조물과 유체의 경계면에서의 평형조건을 만족하기 시키기 위하여 유체의 절점압력으로부터 구조물에 작용하는 등가절점하중을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{NP} = -\mathbf{M}_{pp}^l \ddot{\mathbf{u}}_p - \mathbf{M}_{p\eta}^l \ddot{\boldsymbol{\eta}} - g\mathbf{K}_{p\eta}^l \boldsymbol{\eta} - \mathbf{K}_{p\eta}^l \mathbf{A} \quad (16)$$

여기서, $\mathbf{M}_{pp}^l = \mathbf{NP}_1$, $\mathbf{M}_{p\eta}^l = \mathbf{NP}_2$, $\mathbf{K}_{p\eta}^l = \mathbf{NP}_3$ 이며 \mathbf{N} 은 구조물의 형상함수행렬이다.

만약 구조물 바닥면의 수직방향 변위를 0으로 가정하면 식 (13)을 이용하여 $\ddot{\mathbf{u}}_p$ 과 $\boldsymbol{\eta}$, 그리고 $\ddot{\boldsymbol{\eta}}$ 의 함수로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{P}_p = \mathbf{P}_1 \ddot{\mathbf{u}}_p + \mathbf{P}_2 \ddot{\boldsymbol{\eta}} + g\mathbf{P}_3 \boldsymbol{\eta} + \mathbf{P}_3 \mathbf{A} \quad (17)$$

$$\mathbf{M}_{\eta p} \ddot{\mathbf{u}}_p + \mathbf{M}_{\eta\eta} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + g\mathbf{K}_{\eta\eta} \boldsymbol{\eta} + \mathbf{K}_{\eta\eta} \mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (18)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1 &= -\hat{\mathbf{H}}_{pp}^{-1} \hat{\mathbf{G}}_{pp} & \mathbf{P}_2 &= -\hat{\mathbf{H}}_{pp}^{-1} \hat{\mathbf{G}}_{p\eta} & \mathbf{P}_3 &= -\hat{\mathbf{H}}_{pp}^{-1} \hat{\mathbf{H}}_{p\eta} \\ \mathbf{M}_{\eta p} &= \hat{\mathbf{G}}_{\eta p} - \hat{\mathbf{H}}_{\eta p} \hat{\mathbf{H}}_{pp}^{-1} \hat{\mathbf{G}}_{pp} & \mathbf{M}_{\eta\eta} &= \hat{\mathbf{G}}_{\eta\eta} - \hat{\mathbf{H}}_{\eta p} \hat{\mathbf{H}}_{pp}^{-1} \hat{\mathbf{G}}_{p\eta} & \mathbf{K}_{\eta\eta} &= \hat{\mathbf{H}}_{\eta\eta} - \hat{\mathbf{H}}_{\eta p} \hat{\mathbf{H}}_{pp}^{-1} \hat{\mathbf{H}}_{p\eta} \end{aligned}$$

하부 구조물의 경계조건을 적용한 유체 구조물 상호작용 해석 식을 유도한다. 구조물과 유체의 경계면에서의 적합조건을 만족시키기 위하여 절점변위벡터 \mathbf{u} 를 유체와 구조물이 맞닿는 부분의 절점변위벡터 \mathbf{u}_p 와 자유수면 상부 구조물 부분의 절점변위벡터 \mathbf{u}_o 로 분리하여 정리하면 유체-구조물 상호작용의 지배방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$[\bar{\mathbf{M}}] \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_o \\ \ddot{\mathbf{u}}_p \\ \ddot{\boldsymbol{\eta}} \end{Bmatrix} + [\bar{\mathbf{C}}] \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_o \\ \dot{\mathbf{u}}_p \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{Bmatrix} + [\bar{\mathbf{K}}] \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_o \\ \mathbf{u}_p \\ \boldsymbol{\eta} \end{Bmatrix} = -[\bar{\mathbf{M}}] \mathbf{r} \ddot{\mathbf{u}}_g - [\bar{\mathbf{K}}] \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_p \\ \mathbf{A}_\eta \end{Bmatrix} \quad (19)$$

다음은 면진장치를 고려해야한다. 본 연구에서는 LRB 면진장치를 모형화하고 이를 유체-구조물-면진장치 시스템으로 확장하여 면진장치가 고려된 유체저장 구조물의 해석 기법을 개발한다. 우선 합성고무와 강철 댐퍼에 의해 발생하는 힘을 나타내는 식인 다음 식을 이용한다.

$$F = \alpha \frac{F^y}{y} x(t + \Delta t) + (1 - \alpha) F^y Z = k_b x(t + \Delta t) + c_b \quad (20)$$

여기서 α 는 항복전후 강성비이고, F^y 는 항복하중이며, Y 는 항복변위이다. 또한 면진장치가 포함된 유체 저장탱크 하부구조물의 운동방정식은 식(21)과 같다.

$$\mathbf{r}^T [\bar{M}] \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_o \\ \ddot{\mathbf{u}}_p \\ \ddot{\boldsymbol{\eta}} \end{Bmatrix} + (\mathbf{r}^T [\bar{M}] \mathbf{r} + m_b) \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b = -(\mathbf{r}^T [\bar{M}] \mathbf{r} + m_b) \ddot{u}_g \quad (21)$$

상부 구조물의 경계조건을 적용한 식 (13)과 하부 구조물의 경계조건을 적용한 식 (19)에 면진장치가 포함된 식 (21)을 결합하면 유체-구조물-면진장치 상호작용을 고려한 전체 식 (22)가 완성된다.

$$\begin{bmatrix} [\bar{M}] & [\bar{M}] \\ \mathbf{r}^T [\bar{M}] & \mathbf{r}^T [\bar{M}] \mathbf{r} + m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_o \\ \ddot{\mathbf{u}}_p \\ \ddot{\boldsymbol{\eta}} \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\bar{C}] & 0 \\ 0 & c_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_o \\ \dot{\mathbf{u}}_p \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\bar{K}] & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_o \\ \mathbf{u}_p \\ \boldsymbol{\eta} \\ u_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{pp}^l & \mathbf{K}_{p\eta}^l \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_{\eta\eta}^l \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_p \\ \mathbf{A}_\eta \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [\bar{M}] & [\bar{M}] \\ \mathbf{r}^T [\bar{M}] & \mathbf{r}^T [\bar{M}] \mathbf{r} + m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{r} \ddot{u}_g \\ \ddot{u}_g \end{Bmatrix} \quad (22)$$

여기서

$$[\bar{M}] = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{oo}^s & \mathbf{M}_{op}^s & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{po}^s & \mathbf{M}_{pp}^s + \mathbf{M}_{pp}^l & \mathbf{M}_{p\eta}^l \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{\eta p}^l & \mathbf{M}_{\eta\eta}^l \end{bmatrix} \quad [\bar{C}] = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{oo}^s & \mathbf{C}_{op}^s & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{po}^s & \mathbf{C}_{pp}^s + \mathbf{C}_{pp}^l & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_{\eta\eta}^l \end{bmatrix}$$

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{oo}^s & \mathbf{K}_{op}^s & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{po}^s & \mathbf{K}_{pp}^s & \mathbf{K}_{p\eta}^l \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_{\eta\eta}^l \end{bmatrix}$$

위의 지배방정식으로부터 시간영역의 유체구조물 상호작용 해석을 수행할 수 있으며, 구조물의 변위와 슬러싱 높이의 시간이력을 구할 수 있다.

4. 수치해석 및 결과 분석

4.1 선형자유수면 경계조건과 비선형 자유수면 경계조건에 대한 자유수면 거동

앞에서 유도된 유체-구조-면진장치의 상호작용 해석을 위한 식을 이용하여 시간영역에 관한 지진해석을 수행한다. 해석 대상 구조물의 형태와 재원은 아래와 같으며, 강제 진동해석을 위하여 입력지반 가속도 2.5g를 최대 지반가속도로 같은 조화하중을 사용하여 수평강제진동 해석을 수행하였다.

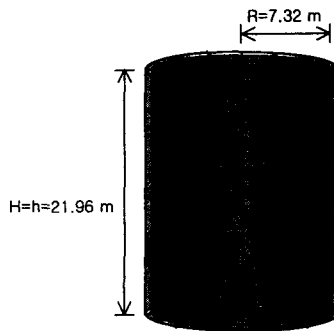


그림 1 수평강제진동 해석대상 구조물

제원		단위	값
구조물	반지름	m	7.32
	벽체높이	m	21.96
	두께	m	0.0256
	밀도	kg/m ³	7840
	포아송비	-	0.3
	탄성계수	GPa	206.7
유체	높이	m	21.96
	밀도	kg/m ³	1000
면진장치	강성 [Ke]	GN	0.15
	항복하중	KN	6900
	항복변위	cm	0.65

표 1 해석대상 구조물의 제원

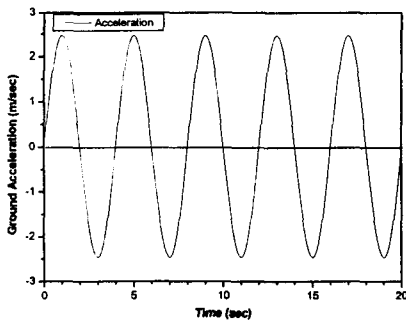


그림 2 강제진동해석을 위한 입력지반가속도

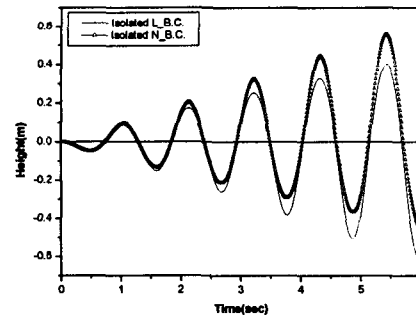


그림 3 $x=7.32\text{m}$, $y=0.0\text{m}$ 지점에서의 수면변위

해석결과는 그림 3에서 알 수 있듯이 선형 자유수면 경계조건을 고려한 경우 비선형 자유수면경계조건을 고려한 경우의 자유수면 슬로싱 높이에 비하여 그 값이 작음을 알 수 있다. 해석 결과로부터 비선형 해석에 있어서의 거동이 잘 묘사됨을 확인 하였다. 또한 보다 정확한 자유수면의 슬로싱 높이를 구하기 위하여 비선형 해석이 필요함을 알 수 있다.

4.2 실제 유체저장 탱크의 면진장치의 유무에 대한 자유수면 및 구조물의 응답

해석 대상 구조물은 그림 4와 같고 제원은 표 2에 나타내었다. 지진은 한국의 지형에 적용되는 최대 지반가속도 0.2g 인 인공지진을 이용하여 해석을 수행하였다.

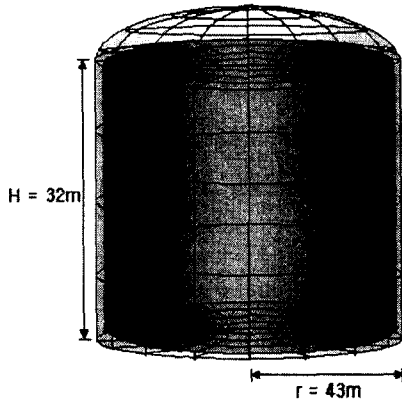


그림 4 해석 대상 구조물

제원		단위	값	
구조물	반지름	m	43	
	높이	벽체	m	32
		지붕	m	12
	두께	m	0.75	
	밀도	kg/m ³	2500	
	포아송비	-	0.2	
탄성계수	GPa	26		
유체	높이	m	32	
	밀도	kg/m ³	1000	
면진장치	강성 [Ke]	GN	24	
	항복하중	KN	6900	
	항복변위	cm	0.65	

표 2 해석 대상 구조물의 제원

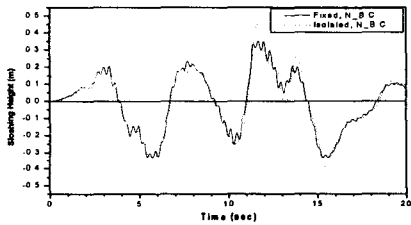


그림 5 자유수면 변위의 시간이력

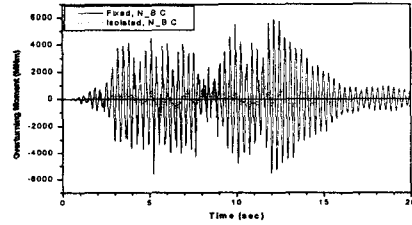


그림 6 하부전도모멘트의 시간이력

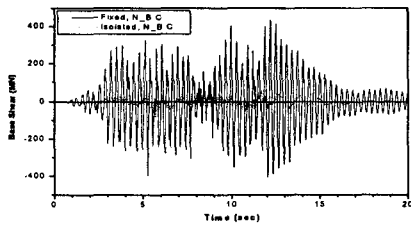


그림 7 하부 전단력의 시간이력

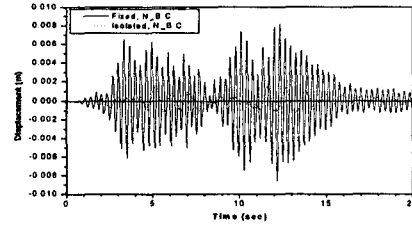


그림 8 구조물 상단 수평변위의 시간이력

그림 5를 통해서 면진장치가 포함된 유체저장탱크가 비면진인 경우보다 자유수면의 변위가 더 크게 나타남을 관찰할 수 있다. 이는 면진장치가 구조물에 설치될 경우 구조물의 고유주파수가 유체의 고유주파수쪽으로 접근하여 자유수면의 출렁임이 크게 나타남을 보여준다. 또한 그림 6~8은 구조물의 거동을 모사하고 있다. 즉 면진장치가 설치된 경우 하부전도모멘트 하부 전단력과 구조물의 상단부 수평변위가 더 작게 나타남을 보여준다. 이는 면진장치로 인하여 구조물로 전달되는 지진에너지가 소산됨을 잘 보여주는 그래프이다.

5. 결론

본 연구에서는 비선형 자유수면 경계조건을 고려한 3차원 유체저장 구조물의 유체-구조물-면진장치 상호작용 해석을 위해 비선형 자유수면 경계조건을 고려한 유체 영역은 경계요소로, 구조물은 유한요소로 모형화하였으며 면진장치를 결합하여 해석 기법을 개발하였다. 자유수면의 슬로싱 거동과 구조물의 휨모멘트, 전단력, 변위등을 관찰하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 면진장치가 포함된 유체-구조물-면진장치 상호작용계 지배방정식을 유도하였으며, 개발된 수치해석기법을 이용하여, 유체의 높이에 따른 자유수면의 변위와 구조물의 거동을 관찰하였다. 물이 꽉 찬 탱크의 경우 선형 경계조건에서의 경우보다 비선형 경계조건의 경우 자유수면의 변위가 다소 크게 나타났으며, 면진을 고려하지 않은 바닥 고정된 경우 보다 면진장치가 포함된 경우 자유수면의 변위가 더 크게 나타났으며, 구조물의 최대전도 모멘트, 최대 전단력, 상단 수평변위는 각각 월등한 감소를 보였다. 따라서 유체저장 구조물 설계시 비선형 자유수면 경계조건을 고려해야 하며, 면진장치의 영향도 반드시 고려하여 설계하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 건설기술연구개발사업으로부터 연구비 지원을 받아 이루어졌으며 이를 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim, M. K., Lim, Y. M., Cho, S. Y., Cho, K. H., and Lee, K. W., "Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks using the BE-FE-BE coupling technique." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, 2002, pp.1151-1158.
2. 김문겸, 임윤목, 조성용, 조경환, "유한요소-경계요소 조합에 의한 3차원유체저장 구조물의 주파수영역 응답 해석", 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol.3, No.1, 1999, pp.275-283.
3. Haroun, M. A. and Housner, G. W., "Earthquake response of deformable liquid storage tanks," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 48, June 1980, pp. 411-418.
4. Kasuga, L., Sugino, R., and Tosaka, N., "Sloshing motion in a cylindrical container by boundary element method," *Boundary Element Methods*, Eds. M. Tanata, Q. Du and T. Honma, Elsevier, 1993, pp.315-324.
5. 고현무, 박장호, 김재관, "경계요소-유한요소 연계법에 의한 구형 수조구조물의 동적거동 특성 해석," 대한토목학회 논문집, 제14권, 제5호, 1994, pp. 1033-104.