

유체-구조물-지반 상호작용을 고려한
면진된 유체저장탱크의 3차원 지진응답
**Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks
Considering Liquid-Structure-Soil Interaction**

조 성 용* 김 문 겸** 임 윤 목***
Cho, Seong Yong Kim, Moon Kyum Lim, Yun Mook

ABSTRACT

The effects of the base-isolation system and elastic soil foundation on the behavior of a liquid storage tank are studied. To evaluate the seismic response of liquid storage tank accurately, the coupled dynamic system considering base isolation and soil interaction problem is formulated in time domain. Results show that the base isolation system reduces effectively the radial displacements, base shears, overturning moments, axial resultant stresses and the hydrodynamic pressure by providing flexibility and energy dissipation capability. Base Isolation may, however, increase the relative liquid sloshing amplitude due to the effect of liquid-structure interaction and cause excessive large relative displacements between structure and foundation. In addition to base-isolator, the dynamic behavior of liquid storage tank is related to the flexibility of base foundation, so the analysis of soil-structure interaction is achieved.

1. 서 론

최근 한반도에서 지진이 빈번하게 발생함에 따라 국내에서도 구조물의 내진해석에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 석유, 물, 액화가스 등의 유체를 저장하는 구조물은 지진시 발생하는 유체의 슬러싱 운동으로 인해 손상을 입게 되면 직접적인 경제적 손실뿐만 아니라 저장물의 유출로 인한 환경파괴나 인명피해와 같은 2차적인 재해를 유발시킬수 있다. 따라서 이러한 재해를 사전에 예방하기 위하여 유체 저장탱크의 자유수면 슬러싱 운동에 대한 정확한 해석기법의 개발 필요성이 증대되었다. 유체를 저장하고 있는 구조물에 지진하중이 작용하면 구조물 내의 유체의 유동으로 인하여 유체 동압력이 발생하게 된다. 유체 동압력은 구조물의 거동에 직접적으로 영향을 주게 되므로 유체 동압력의 크기 및 분포 그리고 자유수면의 변화를 산출하기 위한 유체의 유동 해석이 필수적으로 요구된다. 또한 최근에 건설되는 유체 저장탱크는 지진에 의한 피해를 감소시키기 위해서 면진장치가 설치되어 있고, 면진된 유체 저장탱크의 정확한 응답을 예측하는 것은 지진에 의한 피해를 최소화하기 위해 반드시 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유체-구조물-면진장치-지반이 일체화된 통합 해석 프로그램을 시간영역에서 개발하였고, 이를 통해 대상 구조물의 거동

* 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원
*** 연세대학교 토목공학과 부교수, 정회원

을 분석하였다. 유체영역은 자유수면 슬러싱의 영향을 고려한 3차원 경계요소로 모형화하였고, 구조물 영역은 쉘 유한요소로 모형화 하였다. 독립적으로 모형화된 유한요소와 경계요소에 경계면의 적합조건과 평형조건을 적용하여 유체-구조물 상호작용계에 대한 시간영역 운동방정식을 구성하였다. 또한, 구조물과 연결된 비선형 면진장치는 3D-BASIS-ME 에 제안된 이중선형 요소를 사용하였고, 지반은 주파수에 대해 독립적인 등가 스프링-댐퍼로 모형화 하였다. 각각의 개발된 프로그램을 상호연계하여 유연지반상에 놓인 면진 유체저장탱크의 동적해석기법을 개발하였다.

2. 유체-구조물 상호작용계의 모형화

유체-구조물 상호작용계에 대한 모형화는 기존의 많은 연구에서 발표된 바 있다.^[1-3] 즉, 지진 및 유체의 영향을 고려한 유체 저장탱크의 이산화된 운동방정식은 식 (1) 과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\infty}^s & \mathbf{M}_{op}^s & 0 \\ \mathbf{M}_{po}^s & \mathbf{M}_{pp}^s + \mathbf{M}_{pp}^l & \mathbf{M}_{pn}^l \\ 0 & \mathbf{M}_{np}^l & \mathbf{M}_{nn}^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_o \\ \ddot{\mathbf{u}}_p \\ \ddot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\infty}^s & \mathbf{C}_{op}^s & 0 \\ \mathbf{C}_{po}^s & \mathbf{C}_{pp}^s & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}_{nn}^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_o \\ \dot{\mathbf{u}}_p \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\infty}^s & \mathbf{K}_{op}^s & 0 \\ \mathbf{K}_{po}^s & \mathbf{K}_{pp}^s & \mathbf{K}_{pn}^l \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_{nn}^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_o \\ \mathbf{u}_p \\ \boldsymbol{\eta} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\infty}^s & \mathbf{M}_{op}^s & 0 \\ \mathbf{M}_{po}^s & \mathbf{M}_{pp}^s + \mathbf{M}_{pp}^l & \mathbf{M}_{pn}^l \\ 0 & \mathbf{M}_{np}^l & \mathbf{M}_{nn}^l \end{bmatrix} \{R\} \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, $[\mathbf{M}^s]$, $[\mathbf{C}^s]$, $[\mathbf{K}^s]$ 는 구조물의 질량행렬, Rayleigh 감쇠행렬, 강성행렬이고, $[\mathbf{M}^l]$, $[\mathbf{C}^l]$, $[\mathbf{K}^l]$ 는 유체의 질량행렬, Rayleigh 감쇠행렬, 강성행렬이다. 또한, $\{R\}$ 와 $\ddot{\mathbf{u}}_g$ 는 각각 지진영향계수 및 지반가속도를 의미한다. $\ddot{\mathbf{u}}_p$ 는 구조물과 유체의 접촉면에서의 절대가속도 벡터, $\dot{\boldsymbol{\eta}}$ 는 각각 유체 자유수면에서의 가속도 벡터를 나타낸다. 아래첨자 “p” 는 구조물과 유체의 접촉면에 위치한 절점을, “n” 는 자유수면에서의 절점을 의미한다.

3. 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 면진된 유체저장탱크의 모형화

3.1 면진장치의 모형화

지진에너지가 상부로 전달되는 것을 차단하기 위해서 많은 유체 저장탱크에 면진장치가 설치되어 있다. 구조물의 지진응답을 저감시키기 위하여 사용되는 면진장치의 하중-변위 관계는 면진장치의 감쇠특성으로 인하여 일반적으로 비선형이다. 유체 저장탱크의 거동예측 결과는 면진장치의 비선형 특성을 표현하는 수학적 모형의 정확성에 의하여 좌우된다. 본 연구에서는 3D-BASIS-ME^[4]에서 제안된 식 (20) 과 같은 Hysteretic Element 를 이용하여 LRB 면진장치를 모형화 하였

다.

$$F = \alpha \frac{F^y}{Y} u_b + (1 - \alpha) F^y Z \quad (2)$$

여기서, α , F^y 그리고 Y 는 그림 1 에 나타난 바와 같이 각각 항복전과 항복후의 강성비, 항복 하중 그리고 항복변위이다. Hysteresis loop 를 지배하는 변수 Z 는 다음 식 (21) 에 의해 결정되는 무차원 변수이다.^[5]

$$\dot{Z} = [A\dot{X} - Z^2(\gamma \text{Sgn}(\dot{X}Z) + \beta)]/Y \quad (3a)$$

$$\dot{Z} = f(\dot{X}, Z) \quad (3b)$$

여기서 A, λ , 그리고 β 는 이력곡선의 모양을 좌우하는 변수로 일반적으로 $A=1$, $\lambda=0.9$, 그리고 $\beta=0.1$ 이 사용된다. 식 (3) 에서 Fourth-Order Runge-Kutta Method를 적용하면 Z_{i+1} 를 구할 수 있다.

$$Z_{i+1} = Z_i + \left[\frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \right] \Delta T \quad (4)$$

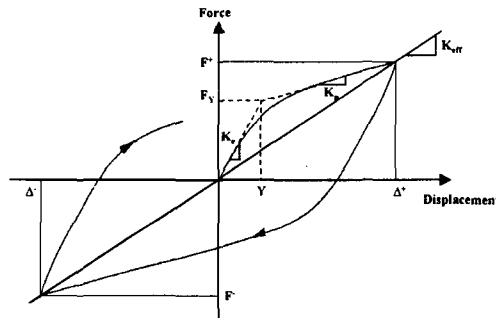


그림 1 면진장치의 하중-변위 루프

3.2 지반의 모형화

탄성반무한체에 놓인 지반을 모형화 하기 위해서, 지반-구조물 상호작용계수가 lumped-spring 모델로 사용되었다. Whitman 등^[6]에 의해 주파수 독립적인 상호작용계수가 개발되었고, Tsai 등^[7]에 의해 이 모형의 유용성이 입증되었다. 이들은 지반의 스프링상수와 감쇠계수를 각각 다음 식 (5)와 (6)과 같이 정리하였다.

$$k_f = \frac{32(1 - \nu_f)G_f R_f}{7 - 8\nu_f} \quad (5)$$

$$c_f = 0.576 k_f R_f \sqrt{\frac{\rho_f}{G_f}} \quad (6)$$

여기서, ν_f , G_f 그리고 ρ_f 는 지반의 포아송 비, 전단탄성계수, 밀도이고, R_f 는 원형바닥판의 반

경이다.

3.3 면진된 유체저장탱크의 운동방정식

최종적으로 그림 2 과 같은 유체-구조물-면진장치-지반을 포함한 구조물에 대한 운동방정식은 식 (2)와 (5),(6)를 상부 유체 저장탱크의 운동방정식 (1) 과 결합하여 식 (7) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} M & Mr & Mr \\ r^T M & r^T Mr + m_b & r^T Mr + m_b \\ r^T M & r^T Mr + m_b & r^T Mr + m_b + m_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C & 0 & 0 \\ 0 & c_b & 0 \\ 0 & 0 & c_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{v}_b \\ \dot{v}_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & k_b & 0 \\ 0 & 0 & k_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ v_b \\ v_f \end{pmatrix} \\
 & = - \begin{pmatrix} M & Mr & Mr \\ r^T M & r^T Mr + m_b & r^T Mr + m_b \\ r^T M & r^T Mr + m_b & r^T Mr + m_b + m_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \ddot{u}_g \\ \ddot{u}_g \\ \ddot{u}_g \end{pmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서,

$$M = \begin{pmatrix} M_{oo}^s & M_{op}^s & 0 \\ M_{po}^s & M_{pp}^s + M_{pp}^l & M_{p\eta}^l \\ 0 & M_{\eta p}^l & M_{\eta\eta}^l \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} C_{oo}^s & C_{op}^s & 0 \\ C_{po}^s & C_{pp}^s + C_{pp}^l & C_{p\eta}^l \\ 0 & 0 & C_{\eta\eta}^l \end{pmatrix}, \quad K = \begin{pmatrix} K_{oo}^s & K_{op}^s & 0 \\ K_{po}^s & K_{pp}^s + K_{pp}^l & K_{p\eta}^l \\ 0 & 0 & K_{\eta\eta}^l \end{pmatrix} \quad (8)$$

그리고,

$$v = \begin{pmatrix} v_o \\ v_p \\ \eta \end{pmatrix}, \quad \dot{v} = \begin{pmatrix} \dot{v}_o \\ \dot{v}_p \\ \dot{\eta} \end{pmatrix}, \quad \ddot{v} = \begin{pmatrix} \ddot{v}_o \\ \ddot{v}_p \\ \ddot{\eta} \end{pmatrix} \quad (9)$$

이다.

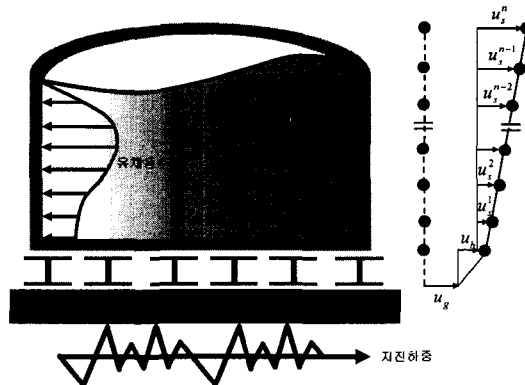


그림 2 반무한 지반상에 있는 면진된 유체저장탱크의 모형화

4. 수치해석 및 분석

4.1 해석대상모형화

본 연구에서 개발된 수치해석기법을 이용하여 면진장치와 지반기초가 유체 저장탱크의 동적거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 시간이력 지진가속도 하중을 LNG 저장탱크에 적용하여 수치해석을 수행하였다. 입력된 지반 가속도 시간이력은 1940년 Imperial Valley, California Elcentro 지진의 N-S 성분으로 최대 가속도는 $0.348 g$ 이고, 해석에 사용된 가속도의 지속시간은 40초이다. 시간이력에 따른 구조물과 유체 자유수면의 감소효과를 나타내기 위해 상호작용모드와 sloshing 모드에 대한 감소비는 각각 2% 와 0.5% 를 사용하였다. 수치해석을 위한 유체 저장탱크, 액화천연가스, 면진장치 그리고 지반의 제원과 물성치는 표 1 에 나타나 있다. 유한요소 모형화는 그림 3에 나타나 바와 같이 유체 저장탱크를 원주방향으로 16 등분 높이방향으로 6 등분으로 나누어 총 96 개의 유한요소와 416 개의 절점을 사용하였고, 유체영역 경계요소 모형화에는 자유수면과 바닥면에 각각 48 개의 요소를 사용하고 벽면은 96 개의 경계요소를 사용하여 총 192 개의 경계요소와 770 개의 절점을 사용하였다.

4.2 시간응답 해석

그림 4~그림 6 은 각각 비면진, 면진된 유체 저장탱크의 반경방향 상대변위, 바닥 전도모멘트 그리고 바닥 전단력의 시간이력을 나타낸 것이고, 표 2 는 각각의 경우에 대한 지진 응답의 최대값을 나타낸 것이다. 그림에서 면진장치와 지반을 고려한 경우 바닥에 고정시킨 경우에 비하여 반경방향 변위, 전도모멘트, 바닥전단력 그리고 탱크벽체의 축응력이 50% 이상 감소함을 알 수 있다. 이는 유체 저장탱크와 기초바닥 사이에 면진장치를 설치하므로써 상부구조물의 동적응답을 크게 줄여서 유체 저장탱크의 상대변위 및 구조물에 작용하는 최대응력을 줄일 수 있음을 의미한다. 이에 반해 유체 자유수면의 변위는 그림 7 에서와 같이, 구조물에 유연한 면진장치가 설치되어 있을 경우 비면진된 경우에 비해 유체의 변위가 상당량 증가됨을 알 수 있다. 이는 지반과 면진장치에 의해 구조물의 응답이 저주파수 대역으로 이동되어 저주파 운동인 유체자유수면 운동과 공진하게 되어 발생하는 현상이다. 그림 8 은 면진장치의 수평방향 변위와 바닥전단력의 관계를 도시한 것으로 최대 수평방향 변위는 21.30cm 이다. 이로부터 유체 저장탱크와 기초바닥 사이에 면진장치를 설치하면 지반으로부터 상부구조물로 전달되는 지진하중을 감소시킴으로써 구조물의 안전성을 증대시킬 수 있으나, 면진된 유체 저장탱크에서는 상부로 전달되는 지진하중의 진동수 영역이 저진동수 특성을 나타내게 되므로 저진동수 특성을 갖는 유체 자유수면 운동의 증폭을 유발하여 내부 유체의 유출을 야기할 수 있음을 알 수 있다.

유체 저장탱크의 바닥 전단력이 최대값을 갖는 순간의 유체 동수압이 그림 10 에 도시되어 있다. 그림에서 면진장치가 설치된 구조물은 면진장치가 설치되지 않은 구조물에 비해 구조물의 상대변위가 감소하고 그 거동양상이 강체거동에 근접함을 알 수 있다.

표 1 해석대상 제원 및 물성치

제원 및 물성		단위	제원 및 물성치
Tank	반경	<i>m</i>	7.679
	구조물 높이	<i>m</i>	11.61
	구조물 두께	<i>m</i>	0.6
	구조물의 밀도	<i>kg/m</i>	2500.0
	포아송 비	-	0.20
	탄성계수	<i>GPa</i>	26.0
액화	유체의 높이	<i>m</i>	7.679
천연가스	유체의 밀도	<i>kg/m</i>	455.0(-162 °C)
면진장치	강성비	-	0.144
	항복하중	<i>KN</i>	398.0
	항복변위	<i>cm</i>	0.43
지반	탄성계수	<i>MPa</i>	1612.0
	포아송 비	-	0.3
	지반의 밀도	<i>kg/m</i>	2400

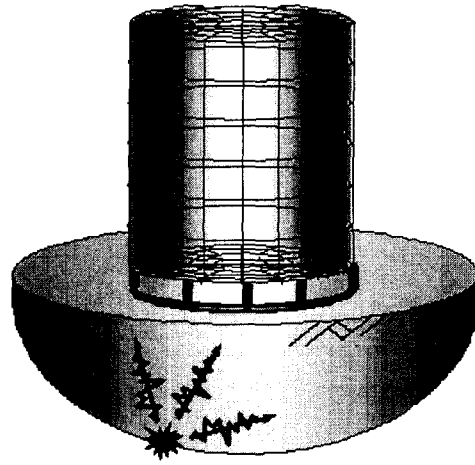


그림 3 해석대상 모형화

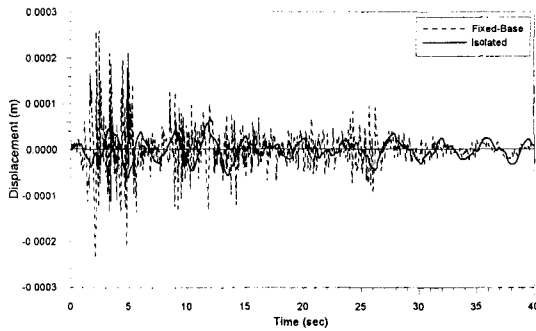


그림 4 반경방향변위의 시간이력

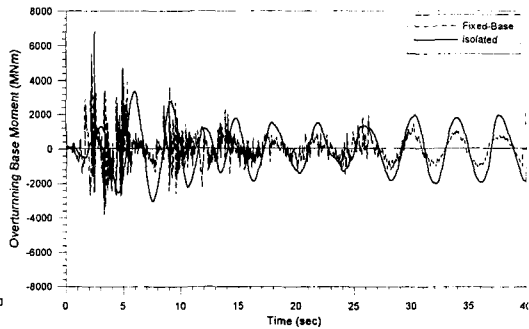


그림 5 바닥 전도모멘트의 시간이력

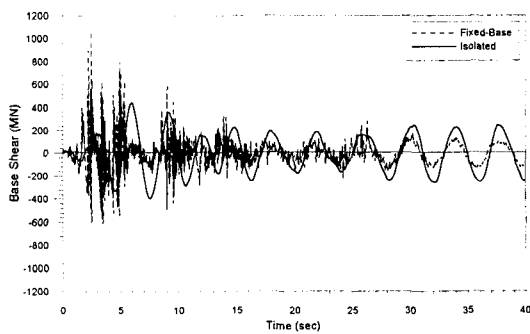


그림 6 따른 바닥 전단력의 시간이력

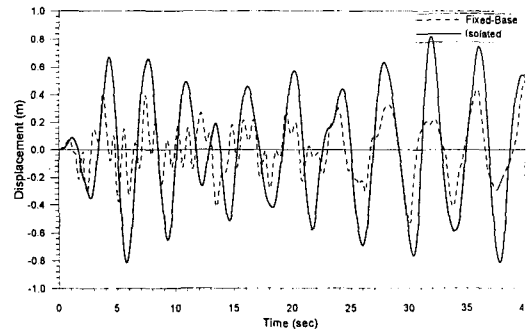


그림 7 유체 자유수면 변위의 시간이력

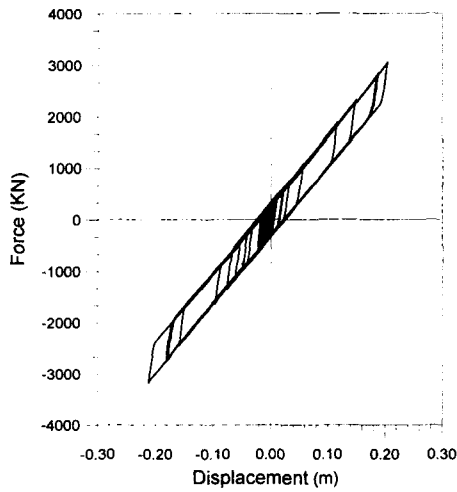


그림 8 면진장치의 하중-변위 이력곡선

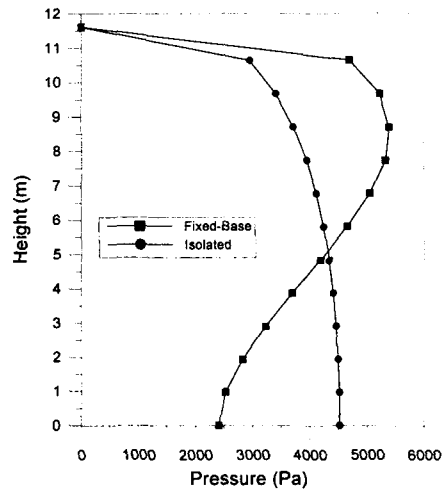


그림 9 유체동수압 분포

표 2 유체 저장탱크의 지진응답 최대값

	SI Unit	본 연구		
		비면진	면진(Case 1)	Difference
최대 반경방향 변위	(cm)	0.026	0.006	76.92%
최대 전도 모멘트	(Nm)	6.833×10^6	3.391×10^6	50.37%
최대 바닥 전단력	(N)	1.068×10^6	4.407×10^5	58.74%
최대 최대 축응력	(N/mm)	3.995×10^1	1.982×10^1	50.37%
최대 슬러싱 높이	(cm)	52.89	81.95	54.94%
면진장치의 최대 변위	(cm)	-	21.30	-

5. 결론

본 연구에서는 유체-구조물-면진장치가 일체화된 3차원 유체저장 구조물의 거동을 해석하기 위한 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 면진장치의 유무에 따른 구조물의 동적 거동 및 유체 자유수면 거동을 해석하였다. 예제해석 결과, 면진장치가 설치될 경우 구조물의 변위, 전도모멘트, 바닥전단력 및 탱크 벽체의 축응력이 감소함을 알 수 있었다. 반면에 면진장치가 설치되면 구조물의 응답이 저주파 대역으로 이동하여 저주파 특성을 나타내는 유체 자유수면 운동이 증폭될 수 있음을 보였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 유체 저장탱크와 기초바닥 사이에 면진장치를 설치하면 지반으로부터 상부구조물로 전달되는 지진하중을 감소시킴으로써 구조물의 안전성을 증대시킬 수 있다. 그러나 면진 유체 저장탱크에서는 상부로 전달되는 지진하중의 진동수 대역이 낮아져 유체 자유수면 변위가 증폭되어 내부 유체가 유출될 수 있으며, 비면진 유체 저장탱크에 비해 지반과의 상대 변위가 증가하므로 연결된 부속시설 등에 피해가 발생할 수 있다. 이에 유체 저장탱크에 면진장치를 설치할 경우 적절한 면진장치의 강성 및 감쇠의 최적치를 선정하여 설계하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 두뇌한국21 사업과 건설교통부 2001년도 건설기술연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김문겸, 임운목, 조성용, 조경환, "면진장치를 포함한 유체 저장탱크의 3차원 지진해석", 대한토목학회 논문집, 제 22권, 제3-A호, 2002, pp. 587-597.
2. 고희무, 박장호, 김재관, "경계요소-유한요소 연계법에 의한 구형 수조구조물의 동적거동 특성 해석", 대한토목학회 논문집, 제 14권, 제5호, 1994, pp. 1033-1042.
3. 김재관, 이진호, 진병무, "경계요소법에 의한 이상유체의 부가질량 및 슬러싱 강성행력 도출과 원통형 액체저장탱크 지진응답해석", 대한토목학회 논문집, 제4권, 제3호(통권 제15호), 2000, pp. 83-98.
4. Tsopelas, P.C., Constantinou, M.C., and Reinhorn, A.M., "3D-BASIS-ME: Computer Program for Nonlinear Dynamic Analysis of Seismically Isolated Single and Multiple Structures and Liquid Storage Tanks," Technical Report NCEER-94-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1994.
5. Park, Y.J., Wen, Y.K. and Ang, A.H.S., "Random Vibration of Hysteretic Systems under Bidirectional Ground Motions," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, No.4, 1986, pp.543-557.5.
6. Whitman, R.V. and Richart, F.E., Design Procedures for Dynamically Loaded Foundations, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.93, 1967, No.SM6.
7. Tsai, N.C, Niehoff, I., Swatta, M. and Hadjian, A.H., The use of Frequency Independent Soil-Structure Interaction Parameters, Nuclear Energy and Design, Vol.31, No.2, 1974, pp.168-183.