LNG 저장탱크의 면진시스템 적용을 위한 내진설계

Seismic Design for Application of LNG Storage Tank Isolation System

서 기 영* · 박 현 재* · 김 남 식† · 김 재 민** · 양 성 영***
Ki-Young Seo, Hyun-Jae Park, Nam-Sik Kim, Jae-Min Kim and Seong-Yeong Yang

(Received November 15, 2013 ; Revised January 22, 2014 ; Accepted February 3, 2014)

Key Words : LNG Storage Tank(LNG 저장탱크), Isolation System(면진장치), Seismic Design(내진설계), Friction Pendulum Bearing(마찰진자베어링)

ABSTRACT

The demand of natural gas is gradually increasing as a clean fuel in the world. Therefore, LNG storage tanks and related facilities of the importance of leading a community-based facility have emerged. The seismic design of LNG storage tank including seismic analysis have been developed steadily. But, the seismic analysis and design techniques for LNG storage tanks are lacking, in Korea. Consequently, it is necessary to develop an analysis model that LNG storage tanks in isolation system can describe the behavior. Further, LNG storage tank capable of ensuring safety and economy, it is necessary to develop design techniques. The studies have suggested seismic design procedures of LNG storage tanks with isolation system including triple-FPB and idealized complex hysteresis model of triple-FPB.

1. 서 론

세계적으로도 청정연료인 천연가스에 대한 수요가 점차적으로 증가하고 있는 추세이고 국내에서도 청정연료에 대한 수요와 관심이 증가함에 따라 한국가스공사를 중심으로 액화 LNG 저장시설을 증설하고 있으며, LNG 저장탱크 및 부대시설들이 주요한 사회기반시설물의 중요도가 부각되고 있다. 특히 우리나라는 미국이나 유럽과 같이 배관을 통한 직접 공급이 아닌 초저온 LNG를 도입하므로 안정적인 사용을 위한 대형 LNG 저장탱크는 필수적인 요소가 되었다.

특히, 최근에는 전세계적으로 지진의 위험도가 높아져서 면진장치를 적용한 대형 LNG 저장 구조물에 대한 내진해석 및 설계 기술 확보가 필요한 실정이다.

우리나라는 LRB(lead-plug rubber bearing) 면진장치를 이용한 구조물의 내진설계 및 시공사례가 몇 차례 있었으나, FPB(friction pendulum bearing) 면진장치를 활용한 구조물의 내진설계 및 시공사례는 거의 없는 실정이다. 특히, 선진국에서 사용빈도가 증가하고 있는 triple-FPB 면진장치의 설계 및 시공사례는 전무한 실정이다. 그러나 T-FPB는 더 나은 내진 성능, 기존의 면진 기술에 비해 낮은 건설 비용을 제공하기 때문에 여러 강진지역에서의 사용빈

† Corresponding Author ; Member, Member, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University
E-mail : nskim@pusan.ac.kr
Tel : +82-51-510-2352, Fax : +82-51-513-9596
* HK E&C
** Dept. of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University
*** Samsung C&T

A part of this paper was presented at the KSNVE 2013 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

도가 점차 증가하고 있는 실정이다.

따라서 T-FPB를 포함하는 면진장치의 거동을 묘사할 수 있는 해석모델의 개발과 지진시 LNG 저장탱크의 안전성을 확보할 수 있는 설계기술 개발이 필요하다.

이 연구에서는 T-FPB를 포함한 면진시스템을 갖는 LNG 저장탱크의 면진해석절차를 제시하고, 실제 T-FPB가 사용된 LNG 저장탱크를 통해 검증작업을 실시하였다.

2. 면진 이론

지반과 구조물사이에 설치된 면진장치는 지반을 통해서 전달되는 에너지를 차단 및 흡수한다. 이것은 상부구조물로 전달되는 에너지를 면진장치의 커다란 유연성에 의해서 상부구조물의 주기를 길게 만들어, 이력감쇠특성을 통해 에너지를 흡수한다. 교량과 같은 일반적인 구조물에서는 면진장치를 상부구조물과 연결된 구조부재로 간주하는 2-degree of freedom(DOF)를 갖는 선형시스템으로 이상화 할 수 있다.

이와는 달리, 구조물의 유연성을 무시하고 2-DOF로 설계한 많은 액체저장구조물이 큰 피해를 입은 사례가 나온 후 구조물의 유연성을 고려한 연구가 Haroun[1]과 Malhotra[2] 등에 수행되어졌다. 특히, Malhotra는 면진시스템이 반영되지 않은 액체저장탱크를 3-DOF의 선형시스템으로 이상화시켜 해석하는 방법을 제시하였다.

따라서, 이 연구에서는 Malhotra가 제시한 해석방법을 응용하여 면진시스템을 반영한 액체저장탱크를 3-DOF의 선형시스템으로 이상화시켜 해석하는 방법을 제시하였다. 먼저, 액체질량은 액체질량 중 일부가 구조물과 함께 움직여 구조물에 작용되는 관성력으로 작용하는 impulsive component의 질량 (m_i)과 액체 표면유동, 즉 sloshing에 의해 나타나는 convective component의 질량(m_c)로 구분하고, 면진장치 위에 놓인 바닥층(base floor)의 질량을 m_b로 구분하였다. 그러면 액체저장탱크는 Fig. 1과 같이 m_i, m_c, m_b로 구성된 3-DOF로 이상화 할 수 있다. 이때, 각 질량의 절대변위를 u_c, u_i, u_b로 나타내고, 지반의 변위는 u_g로 나타낸다. 또한, 각각의 질량에 해당하는 상대변위 ν_c, ν_i, ν_b는 아래와 같이 정의하였다.

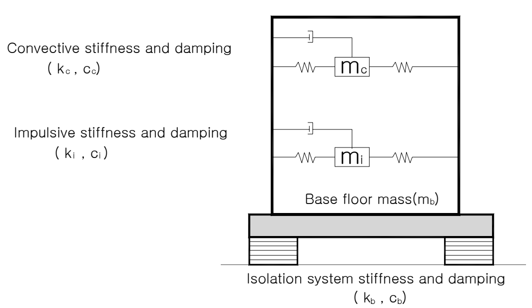


Fig. 1 3-DOF isolation system

$$\begin{aligned} &\nu_c = u_c - u_b (\nu_c \text{ : convective mass의 상대변위}) \\ &\nu_i = u_i - u_b (\nu_i \text{ : impulsive mass의 상대변위}) \\ &\nu_b = u_b - u_g (\nu_b \text{ : 바닥층 mass의 상대변위}) \end{aligned} \quad (1)$$

상대변위(ν_c, ν_i, ν_b)를 사용하여 3-DOF의 운동방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &m_b(\ddot{\nu}_b+\ddot{u}_g)+c_b\dot{\nu}_b+k_b\nu_b = -m_c(\ddot{\nu}_b+\ddot{\nu}_c+\ddot{u}_g) \\ &\qquad -m_i(\ddot{\nu}_b+\ddot{\nu}_i+\ddot{u}_g) \\ &(m_c)(\ddot{\nu}_b+\ddot{\nu}_c+\ddot{u}_g)+c_c\dot{\nu}_c+k_c\nu_c = 0 \\ &(m_i)(\ddot{\nu}_b+\ddot{\nu}_i+\ddot{u}_g)+c_i\dot{\nu}_i+k_i\nu_i = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 상대변위의 항목으로 정리하면 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &(m_b+m_c+m_i)(\ddot{\nu}_b)+(m_c)(\ddot{\nu}_c) \\ &\quad +(m_i)(\ddot{\nu}_i)+c_b\dot{\nu}_b+k_b\nu_b = -(m_b+m_c+m_i)(\ddot{u}_g) \\ &(m_c)(\ddot{\nu}_b)+(m_c)(\ddot{\nu}_c)+c_c\dot{\nu}_c+k_c\nu_c = -(m_c)(\ddot{u}_g) \\ &(m_i)(\ddot{\nu}_b)+(m_i)(\ddot{\nu}_i)+c_i\dot{\nu}_i+k_i\nu_i = -(m_i)(\ddot{u}_g) \end{aligned} \quad (3)$$

이 때, 전체질량 $M=m_b+m_c+m_i$로 정의하고, 식을 정리하면 식 (4)와 같은 매트릭스 형태로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} M & m_c & m_i \\ m_c & m_c & 0 \\ m_i & 0 & m_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\nu}_b \\ \ddot{\nu}_c \\ \ddot{\nu}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 & 0 \\ 0 & c_c & 0 \\ 0 & 0 & c_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\nu}_b \\ \dot{\nu}_c \\ \dot{\nu}_i \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} k_b & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 \\ 0 & 0 & k_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \nu_b \\ \nu_c \\ \nu_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m_c & m_i \\ m_c & m_c & 0 \\ m_i & 0 & m_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 매트릭스 기호를 사용하여 표현하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다[3].

$$\mathbf{M\ddot{v}}+\mathbf{C\dot{v}}+\mathbf{Kv}=-\mathbf{Mr}\ddot{u}_g \qquad (5)$$

식 (5)를 질량비 $\gamma_c=m_c/M$, $\gamma_i=m_i/M$로 치환하고, 각속도($\omega^2=k/m$)를 이용하면, 고유진동수에 대한 특성방적식을 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$(-1+\gamma_c+\gamma_i)\,\omega^6+[(1-\gamma_c)\omega_i^2+(1-\gamma_i)\omega_c^2+\omega_b^2]\omega^4 \\ -(\omega_b^2\,\omega_i^2+\omega_b^2\,\omega_c^2+\omega_c^2\,\omega_i^2)\omega^2+\omega_b^2\,\omega_c^2\,\omega_i^2=0 \qquad (6)$$

식 (6)은 ω^2에 대한 3차방정식으로 표현되고, 이 방정식의 해를 이용하면 3-DOF에서의 각각의 모드에 상응하는 고유진동수를 찾을 수 있다.

3. 면진 시스템

초창기 지진제어대책방법은 강도증가나 연성증가의 방법을 취하는 내진설계가 많이 적용되었다. 그러나 내진설계가 비교적 간단한 장점은 있으나, 지진발생 후 보수보강이 어렵고 비용이 많이 드는 단점이 있는 것으로 나타나, 최근에는 내진설계의 단점을 극복하기 위해 지진에 의한 에너지를 부가적인 장치를 이용하여 흡수 또는 차단함으로써 구조물을 보호하는 면진시스템에 관심이 증대되고 있다. 이러한 면진시스템에는 LRB로 대표되는 탄성받침과 마찰진자받침 등이 많이 사용되고 있다.

3.1 LRB(lead - plug rubber bearing)

LRB는 탄성받침의 대표적인 면진시스템으로써, 저감쇠 고무받침과 유사한 적층고무받침이지만, 하나 혹은 두 개의 중공에 삽입된 납심을 갖고 있다. 받침에서 강판은 납심의 전단변형을 일으키게 만든다.

3.2 FPB(friction pendulum bearing)

FPB는 진자의 원리를 이용한 마찰 면진시스템으로 미끄럼 작용과 형상에 의해 복원력작용을 하는 면진장치이다. 장치의 접합면 사이의 마찰은 면진장치에 감쇠를 제공한다. 면진장치의 유효감쇠와 구조물의 면진주기는 오목면(concave surface)의 곡률반경을 사용하여 제어하는 시스템을 가졌다. 이러한 FPB는 1980년대 말에 single-FPB(S-FPB)가 처음 사용하였으나, 최근에는 triple-FPB(T-FPB)까지 개발되어 사용되고 있다.

(1) S-FPB

S-FPB의 주기는 concave surface의 곡률반경 R에 의해 통제되고, S-FPB의 특성을 반영한 이력곡선은 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다. 일반적인 면진장치의 bilinear 이력곡선은 면진장치에 작용하는 수직하중(V)과 면진장치의 변위(u)의 관계를 통해 그려지지만, FPB의 이력곡선은 normalized shear force $\widetilde{V}$와 변위(u)의 관계로 표현할 수 있다.

여기서, μ는 마찰계수, R은 마찰면의 곡률반경, W는 전체중량이고, $\widetilde{V}(=V/W)$는 normalized shear force로 정의되어 진다.

(2) T-FPB[4]

T-FPB는 Fig. 3과 같이 4개의 곡률면(R_1(2), R_2, R_3)와 3개의 마찰계수(μ_1, μ_2, μ_3)로 구성되어 있고, 이 곡률과 마찰계수의 특성은 지진 위험의 여러 수준을 고려하여 면진장치의 성능을 최적화하기 위해

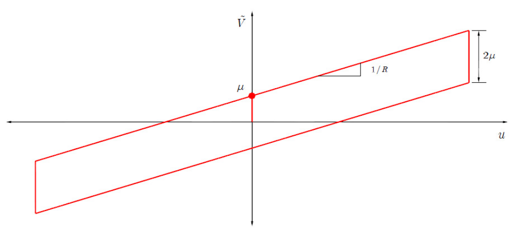


Fig. 2 Idealized hysteresis loop of S-FPB

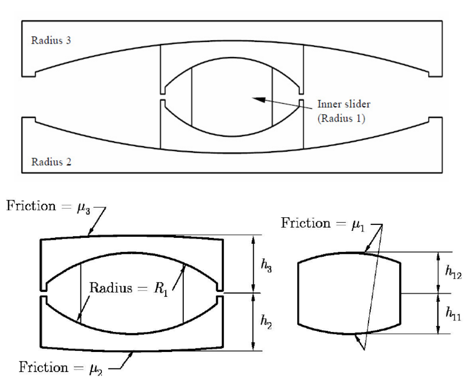


Fig. 3 Parameters characterizing of T-FPB

선택할 수 있게 설계되어야 한다.

또한, 유효진자길이(effective length) L은 아래와 같이 정의된다.

$$L_i = R_i - h_i \tag{7}$$

T-FPB의 이력거동을 이해하기 위해서는 마찰에 따른 수평변위의 거동을 파악해야 한다.

가. 수평변위의 단계

T-FPB는 독립된 3개의 진자 메커니즘의 작용으로 면진장치의 변위 형성단계를 살펴보면 다음과 같은

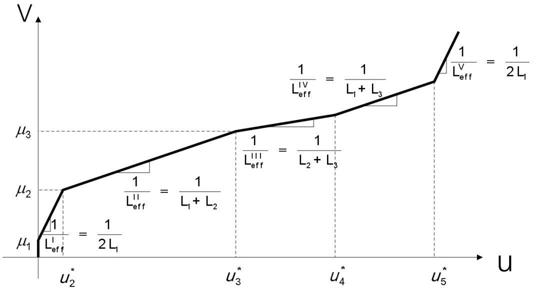
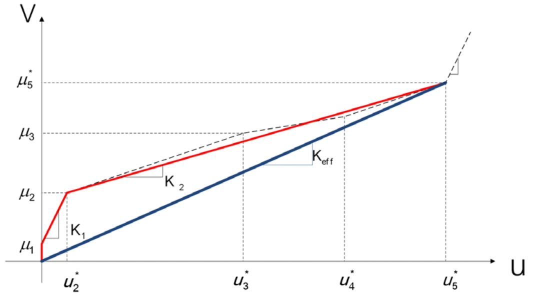
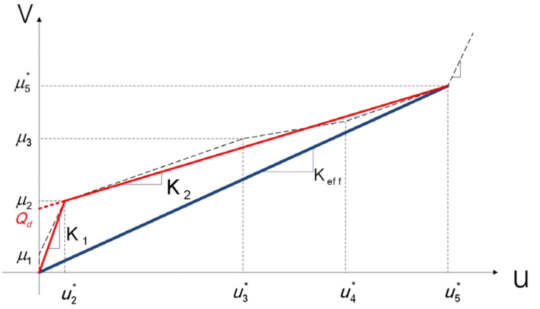


Fig. 4 Idealized force-displacement relationship for T-FPB



(a) Tri-linear hysteresis loop



(b) Bi-linear hysteresis loop

Fig. 5 Idealized hysteresis loop of T-FPB

5단계로 구분되어 진다.

① Inner slider의 변형

첫 번째 변형된 상태는 inner 슬라이더만 회전을 하고, 상단과 하단 outer 표면은 회전에 대해 구속되는 것으로 간주한다. 이 단계는 $\tilde{V}$가 inner slider의 마찰계수를 초과할 때($\tilde{V} > \mu_1$) 발생한다.

② Inner slider변형과 lower surface의 슬라이딩

Inner slider와 lower surface가 작용하는 단계이다. 이 단계는 $\tilde{V}$가 lower slider의 마찰계수를 초과할 때($\tilde{V} > \mu_2$) 발생한다.

③ Lower and upper surfaces 동시에 슬라이딩

이동의 세 번째 단계는 정규화된 전단력($\tilde{V}$)이 upper slider의 마찰계수($\tilde{V} > \mu_3$)를 초과할 경우 발생한다.

④ Inner slider 변형과 upper surface 슬라이딩

단계③의 슬라이딩 단계가 bottom slider 변위한계(displacement capacity)까지 계속된다.

⑤ Inner slider only의 변형(마지막 단계)

마지막 슬라이딩 단계는 upper slider의 변위 능력에 도달했을 때이다. 이 슬라이딩 단계의 시작은 top slider의 회전은 증가하지 않고, 추가되는 변위는 단지 inner slider의 변형을 통해 inner slider의 위능력에 도달할 때까지 지속된다.

나. 이력곡선의 이상화

Fig. 4의 T-FPB의 힘-변위 곡선은 5단계로 나누어져 있어, 해석이나 설계시에 면진장치의 이력곡선이 복잡하여 적용하기 어려운 실정이다. 따라서, 설계나 해석시 복잡한 이력곡선을 간략화 시킬 필요가 있어, Fig. 5와 같이 tri-linear나 bi-linear로 이상화 시켜 적용하면, 유용할 것으로 판단된다. 이때, T-FPB의 측면 변위의 5번째 단계(⑤ inner slider only의 변형)는 급작스러운 파괴를 유발할 수 있어, 이력곡선의 이상화작업은 4단계까지만 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

4. LNG 저장탱크의 내진설계

4.1 설계절차

앞서 연구된 Malhatra와 Haroun의 액체저장탱크의 내진설계 절차와 미국과 유럽의 내진장치의 설계절차(5~7)를 참조하여, 이 연구에서는 아래와 같은

LNG tank의 내진설계절차를 작성하였고, 이 설계 절차 대로 적용사례를 통해 검증 작업을 적용해 보았다.

4.2 적용사례

앞서 제시한 설계절차를 확인하기 위해 실제 설계되었던 멕시코 만자니오 LNG 저장탱크를 선택하였다. 적용한 배경은 T-FPB는 소수의 회사의 기술을 독점하고 있어, 특성을 파악하기가 어려운 실정이다. 그러나 멕시코 LNG 저장탱크는 삼성물산에서 시공하여, 액체저장탱크의 제원이나 T-FPB의 기본적인 특성을 확인할 수 있어, 해석결과의 검증이 용이하기 때문에 적용사례로 선택하였다.

(1) 멕시코 LNG tank의 형상

멕시코 LNG 저장탱크는 Fig. 7과 같은 원통형 저장탱크이고, 외조탱크와 내조탱크, 그리고 매트기초 슬래브와 면진장치로 구성되어 있다.

각 형상별 질량을 정리하면 다음과 같다.

· m_l = 80,626.1 ton (m_l = LNG liquid mass)

· m_{in} = 1,674 ton (m_{in} = 내조탱크 질량)

· $m_{out(wall)}$=16,354 ton, $m_{out(roof)}$=12,066 ton (m_{out} = 외조탱크 질량)

· m_{base}=24282.47 ton(m_{base}=기초매트 질량)

Determine type of seismic isolation system
↓
Tank parameter decision(Malhotra method)
↓
Define design response spectra
↓
Assume seismic isolation system displacement
↓
Calculate K_{eff} & ξ_{eq}
↓
Calculate effective period of isolation system
↓
Determine natural frequencies
↓
Determine modal mass participation factors
↓
Calculate seismic design forces
↓
Calculate isolation system displacement
↓
Check seismic displacement

Fig. 6 Seismic design procedures

(2) 응답스펙트럼 해석

응답스펙트럼은 많은 지진기록으로부터 구한 평균 곡선을 사용하는 것이 합리적이므로, 본 응답스펙트럼 해석은 U.S Atomic Energy Commission의 Regulatory Guide 1.60[(8)](이후 Reg. Guide 1.60)에서 제시한 응답스펙트럼을 사용하였다. Reg. Guide 1.60에서는 ground acceleration이 1 g 기준이므로, 이 연구에서는 0.3 g 기준으로 변환하여 Fig. 8과 같이 사용하였다.

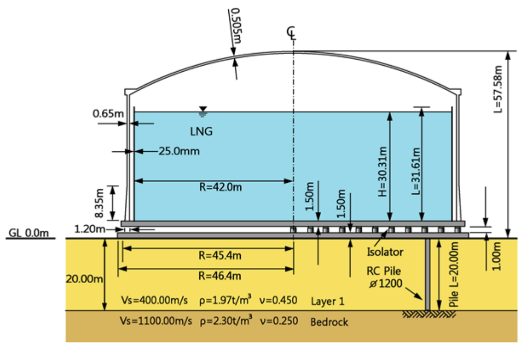


Fig. 7 Shape of the LNG storage tank at Mexico

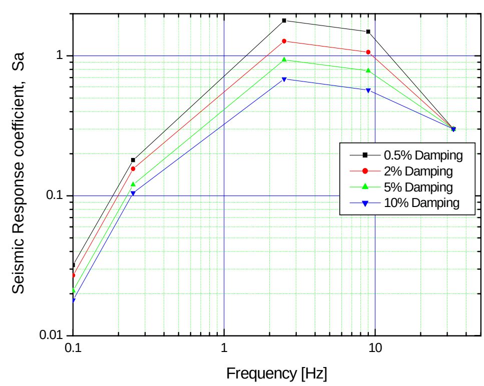
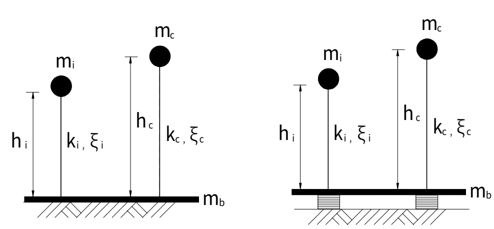


Fig. 8 Seismic response spectrum



(a) Fixed system (b) Isolation system

Fig. 9 Simple model of the LNG storage tank

면진설계를 아래와 같은 절차순서대로 풀이할 수 있다.

① 단계 : Determine type of seismic isolation system

면진장치 type은 fixed system, LRB system, T-FPB system으로 나누어 해석하였다. 멕시코 액체 저장탱크를 Fig. 9와 같이 이상화하였다.

② 단계 : Tank parameter 결정

Tank parameter는 저장탱크에 담긴 액체의 반지름과 높이의 비에 따라 결정되어진다. 이 연구에서 사용되어진 멕시코 LNG 탱크는 H/R=0.722이고, 이때의 tank parameter값들(각 성분별 질량, 거리 등)은 Malhotra[2]의 연구결과를 참조하여 결정하였다. 각 mode별 질량은 m_c = 46,440.6 ton, m_i = 34,185.5 ton이고, 거리는 h_i=12.184 m, h_c=17.398 m, h_i' =29.946 m, h_c' =30.128 m 이다.

③ 단계 : Define design response spectra

응답스펙트럼은 실제 설계지역에서의 스펙트럼을 사용해야 하나, 이 연구에서는 앞서 제시한 Fig. 8의 응답스펙트럼을 사용하였다.

④ 단계 : Assume seismic isolation system displacement

(a) Fixed system

면진장치가 없으므로 면진장치의 변위는 0(m)으로 가정하였다.

(b) LRB system

LRB의 일반적인 특성값에 상응하는 Pseudo-displacement를 토대로 0.12 m로 가정하였다.

(c) FPB system

멕시코 LNG 탱크를 실제 설계자료의 변위값인 0.254 m로 가정하였다.

⑤ 단계 : Calculate K_{eff} & ξ_{eq}

Table 1 Isolation system parameters of LRB

	d_m (m)	K_{eff} (kN/m)	ξ_{eq} (%)	Q_d (kN)	d_y (m)	k_1 (kN/m)	k_2 (kN/m)
LRB	0.12	2,603,678	10	250,198	0.096	3,112,134	518,689

Table 2 Isolation system parameters of FPB

	d_m (m)	K_{eff} (kN/m)	ξ_{eq} (%)	μ	Q_d (kN)	d_y (m)	k_1 (kN/m)	k_2 (kN/m)
FPB	0.254	615,977	32.4	0.059	79,651	0.036	2,237,392	302,627

(a) Fixed system

Fixed system 구조물은 면진장치가 없으므로 K_{eff}와 ξ_{eq}는 고려할 필요가 없다.

(b) LRB system[3]

LRB에서는 유효강성(K_{eff})과 유효감쇠(ξ_{eq})와 같은 특성값들은 계산을 통해 Table 1에 나타내었다.

(c) FPB system[4]

FPB 면진장치의 특성을 반영하는 특성값들은 계산을 통해 Table 2에 나타내었다.

⑥ 단계 : Calculate effective period of isolation system

Impulsive와 convective mode의 주기(T_{imp}, T_{con})는 Malhotra[2]의 방법을 참조하였고, 구조물과 면진장치의 주기(T_{out}, T_{isol})는 결정하였다.

⑦ 단계 : Determine natural frequencies

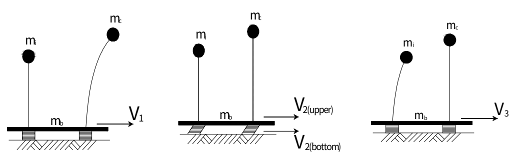
식 (4)의 방정식을 이용하여 각 모드별 고유진동수를 구할 수 있다.

⑧ 단계 : Determine modal mass participation factors

수치해석적인 방법을 이용하여 각 모드별 질량참여율을 구할 수 있고, Table 3에 나타내었다.

Table 3 Period&response spectrum coefficient

		Fixed	Isolation	
			LRB	FPB
Period	T_{imp}(sec)	0.608	0.608	0.608
	T_{con}(sec)	10.330	10.330	10.330
	T_{isol}(sec)	-	1.43	2.94
Response Spectrum coefficient	$S_a(T_{imp})$(g)	0.900	0.900	0.900
	$S_a(T_{con})$(g)	0.031	0.031	0.031
	$S_a(T_{isol})$(g)	0.830	0.220	0.220
Modal mass participation	1 Mode(%)	-	35.28	38.21
	2 Mode(%)	-	63.45	61.72
	3 Mode(%)	-	1.27	0.07



(a) 1st mode (b) 2nd mode (c) 3st mode

Fig. 10 Design seismic forces location

⑨ 단계 : Calculate seismic design forces

(a) Fixed system

외조탱크를 flexible body로 가정하였을 경우 내조탱크 밑면에 작용하는 설계전단력(V_u)과 모멘트(M_u)는 아래와 같이 산정하였다.

$$V_u = m_i \times S_a(T_i) \tag{8}$$

$$M_u = m_i \times S_a(T_i) \times h_i \tag{9}$$

여기서, m_i : 모드별 질량

$S_a(T_i)$: 질량별 지진응답계수

h_i : 질량과 내조탱크밑면까지 거리

면진장치 아래에 작용하는 설계전단력(V_b)과 모멘트(M_b)는 아래식으로 구하였다.

$$V_b = V_u + (m_{out} \times S_a(T_{out})) \tag{10}$$

$$M_b = m_i \times S_a(T_i) \times h_i' \tag{11}$$

여기서, h_i' : 각 질량과 면진장치아래까지 거리

(b) Isolation system(LRB and FPB 동일)

면진장치에서의 각 모드별 힘의 거동은 Fig. 10과 같이 단순화시킬 수 있다. 이 때 모드별 설계지진력은 각 모드별 질량참여율(modal mass participation factor)을 산정하면 다음과 같다.

$$V_1 = C_{s1} \times M \times 1^{st}\,\text{Mode 질량참여율} \times g$$
$$V_2 = C_{s2} \times M \times 2^{nd}\,\text{Mode 질량참여율} \times g \tag{12}$$
$$V_3 = C_{s3} \times M \times 3^{st}\,\text{Mode 질량참여율} \times g$$

내조 탱크 밑면에 작용하는 전단력(V_u)과 모멘트(M_u)는 아래식으로 구할 수 있다.

$$V_u = V_1 + V_{2(upper)} + V_3 \tag{13}$$

$$M_u = V_i \times h_i \tag{14}$$

면진장치 아래에 작용하는 전단력(V_b)과 모멘트(M_b)는 아래식으로 구하였다.

$$V_b = V_u + V_{2(bottom)} \tag{15}$$

$$M_b = V_i \times h' \tag{16}$$

⑩ 단계 : Calculate isolation system displacement

Pseudo-displacement를 통해 면진장치의 변위를 산정할 수 있다.

⑪ 단계 : Check seismic displacement

단계 ④에서 가정한 변위와 단계 ⑩에서 산정된 변위를 비교하여 허용변위이내일 경우 만족하는 것으로 한다.

(3) 시간이력 해석(beam stick model)

시간이력해석은 SAP 2000 프로그램을 beam stick model[9]로 해석하였다. 시간이력 해석을 위한 인공지진파는 Fig. 8에서 제시된 응답스펙트럼을 변환하여 적용하였다[10].

(4) 해석결과

① 면진장치의 최대 변위

LRB와 FPB 면진장치를 사용한 LNG 저장탱크의 응답스펙트럼해석과 시간이력해석을 통해 나온 면진장치의 변위를 Table 4에 표시하였다.

시간이력해석시 면진장치의 이력곡선은 선형(equivalent linear)와 비선형(bi-linear)로 구분하여 해석하였고, 응답스펙트럼해석시 결과와는 eq. linear가 거의 동일한 변위값으로 나타났다.

② 최대 지진력 비교

Table 5는 LRB, Table 6은 FPB를 사용했을 경우 이 연구에서 제시한 내진설계절차를 이용한 응답스펙트럼해석과 시간이력해석법의 결과를 비교하였다.

시간이력해석은 fixed일 경우와 면진장치를 사용

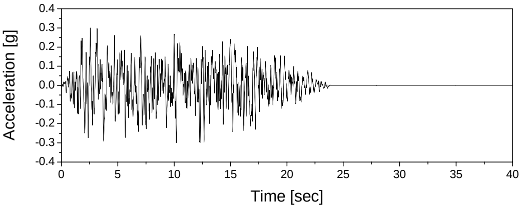


Fig. 11 Artificial seismic waves

Table 4 Displacement of isolation system

Isolation system	Response spectrum analysis	Time history analysis	
LRB	0.120 m	Eq. linear	0.119 m
		Bi-linear	0090 m
FPB	0.254 m	Eq. linear	0.258 m
		Bi-linear	0.144 m

Table 5 Compare seismic forces used to LRB

Seismic force	Response spectrum analysis		Time history analysis		
	Damping (0.5, 2, 10 %)		Damping (0.5, 2, 10 %)		
	Fixed	Isolation	Fixed	Isolation	
		LRB		Eq. linear	Bi-linear
V_u(MN)	331.20	142.39	268.7	122.803	90.004
V_b(MN)	562.60	214.49	332.1	309.578	221.972
M_u(GN·m)	4.16	2.063	4.18	1.665	1.297
M_b(GN·m)	16.46	3.622	8.20	5.102	3.615

Table 6 Compare seismic forces used to FPB

Seismic force	Response spectrum analysis		Time history analysis		
	Damping (0.5, 2, 10 %)		Damping (0.5, 2, 10 %)		
	Fixed	Isolation	Fixed	Isolation	
		LRB		Eq. linear	Bi-linear
V_u(MN)	331.20	76.33	268.7	65.361	56.400
V_b(MN)	562.60	114.59	332.1	159.196	112.114
M_u(GN·m)	4.16	1.068	4.18	0.922	0.836
M_b(GN·m)	16.46	1.908	8.20	2.551	1.938

했을 경우 이력곡선을 선형(eq. linear)으로 가정했을 경우와 비선형(bi-linear)로 가정했을 경우를 구분하여 해석하였다.

Fixed system일 경우 시간이력해석보다 응답스펙트럼 해석이 설계지진력이 다소 크게 나타났다. 면진장치를 사용했을 경우 시간이력해석(bi-linear)과 응답스펙트럼해석 결과를 살펴보면, 면진장치 아래에 작용하는 지진력(V_b, M_b)는 거의 유사한 경향을 나타내며, 탱크벽체밑면에 작용하는 지진력(V_u, M_u)는 응답스펙트럼이 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 면진시스템을 갖는 LNG 저장탱크의 내진해석절차를 개발하고, 복잡한 거동을 하는 T-FPB의 이력모델의 이상화 모델을 제시하였다. 이러한 내진절차방법을 통해 실제 설계되었던 멕시코 LNG 저장탱크를 통해 해석한 결과 이 논문에서 제시한 해석법(응답스펙트럼 해석법)과 일반적으로 활용도가 높은 beam-stick model을 이용한 시간이력해석을 비교·분석한 결과 이 연구에서 제시한 내진설계절차가 유용함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 삼성물산(주)(건설부문)의 재원으로 수행된 연구용역입니다.

References

(1) Haroun, M. A., 1983, Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 179~206.

(2) Malhotra, P. K. and Thomas, W., 2000, Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-storage Tanks, Structural Engineering International, pp. 197~201.

(3) Fazard, N. and James, M. K., 1999, Design of Seismic Isolated Structures : From Theory to Practice.

(4) Morgan, T. A. and Mahin S. A., 2010, Acheving Reliable Performance Echancement Using Multi-stage Friction Pendulum Isolators, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 1443~1461.

(5) AASHTO, 1999, Guide Specifications for Seismic Isolation Design, American Association of State Highway and Transportation Officails, Washington, D. C.

(6) ASCE Standard, 1999, Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Sturctures and Commentary, ASCE 4-98, ASCE.

(7) Eurocode8, 2006, Design Provisions of Earthquake Resistance of Structures, Part 4 : Silos, Tanks and Pipelines, European Committee for Standardization , Brussels.

(8) U. S. Atomic Energy Commission, 1973, Regulatory Guide 1.60.

(9) Kim, J. M., Jang, S. H. and Yun, C. B., 2002, Fluid - Structure - Soil Interaction Analysis of Cylindrical Liquid Storage Tanks Subjected to Horizontal Earthquake Loading, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 13, No. 6, pp. 615~638.

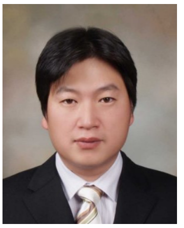
(10) Jeon, B. G., Jang, S. J. and Kim, N, S., 2011, Seismic Performance Evaluation of Cone-type Friction Pendulum Bearing System Using Shaking Table Test,

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No.7, pp. 559~608.

Ki Young Seo received a Ph.D. degree in the Department of Civil Engineering in Pusan National University in 2007. He is currently working in HK E&C. His research interest is Seismic analysis and Isolation system.

Nam Sik Kim is a professor of civil and environmental engineering at Pusan National University. He received his Ph.D. from the department of civil and environmental engineering at KAIST in 1994. His expertise includes structural health monitoring and ambient vibration tests of civil infrastructures. He has been involved in the Super Long Span Bridge R&D Project. He is also currently involved with the Korean research team to evaluate and assess the seismic isolation systems for nuclear power plants. He is a fellow of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering.

Seong yeong Yang received his Ph.D. degree in Civil Engineering from University of Texas at Austin in USA. He is currently working as a principal researcher for Samsung C&T Corp. His main research interests are seismic analysis and design.



Hyun Jae Park received a Ph.D. degree in the Department of Civil Engineering in Pusan National University in 2005. He is currently working in HK E&C. His research interest is Seismic analysis and Isolation system.

Jae Min Kim received his B.S. degree in the Department of Civil Engineering from Seoul National University, and M.S. and Ph.D. degree in the Department of Civil & Environmental Engineering from KAIST, Korea. Currently he is a Professor at Department of Marine & Civil Engineering in Chonnam National University, Korea. His research interests are analysis of coupled dynamic systems including fluid-structure interaction and/or soil-structure interaction, and structural health monitoring of civil infrastructures.