

# LNG 저장탱크의 면진시스템 적용을 위한 내진설계

## Seismic design for application of LNG storage tank isolation system

서기영\* · 박현재\* · 양성영\*\* · 김남식†

Ki-Young Seo, Jae-Hyun Park, Nam-Sik Kim, Seong-Yeong Yang

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

### ABSTRACT

Natural gas as a clean fuel of the world demand for the trend is gradually increasing demand for clean energy in the country and there is growing interest. Therefore, LNG storage tanks and related facilities in the country of the importance of leading a community-based facility has emerged.

So common sense that an earthquake with a seismic isolation device LNG storage tank similar to the actual behavior of the analytical model which can describe the development and construction of storage tanks to enhance the safety and economic design techniques need to be developed.

In this study, a base isolation system, seismic analysis procedure of LNG storage tanks, and Triple-FPB developed a mathematical model of the present crystallized and complexity factors to the sum over histories model simplifies the complex behavior of the LNG storage tank with base isolation system how to interpret the seismic isolation is proposed.

### 1. 서 론

세계적으로도 청정연료인 천연가스에 대한 수요가 점차적으로 증가하고 있는 추세이고 국내에서도 청정연료에 대한 수요와 관심이 증가함에 따라 한국 가스공사를 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 구조물

에 대한 내진해석 및 설계 기술 확보가 필요한 실정이다.

우리나라는 LRB(Lead-plug Rubber Bearing) 면진장치를 이용한 구조물의 내진설계 및 시공사례가 다수 있으나, FPB(Friction Pendulum Bearing) 면진장치를 활용한 구조물의 내진설계 및 시공사례는 많지 않은 실정이다. 특히, 선진국에서 사용빈도가 높은 Triple-FPB 면진장치의 설계 및 시공사례는 전무한 실정이다. 그러나 T-FPB는 더 나은 내진 성능, 기존의 면진 기술에 비해 낮은 건설 비용을 제공하기 때문에 미국과 유럽의 강진지역에서는 사용빈도가 점차 증가하고 있는 실정이다.

따라서 면진장치를 갖는 지상식 LNG저장탱크의 실제 거동을 유사하게 묘사할 수 있는 해석모델의 개발과 저장탱크 구조물의 안전성과 경제성을 제고할 수 있는 설계기술 개발이 필요하다.

이 연구에서는 T-FPB를 포함한 면진시스템을 갖는 LNG 저장탱크의 내진해석절차를 제시하여, 복잡

† 교신저자: 정희원, 부산대학교 사회환경시스템공학부

E-mail : nskim@pusan.ac.kr

Tel : 051-510-2352, Fax : 051-513-9596

\* HK이앤씨

\*\* 삼성물산(주)

한 거동을 하는 지상식 LNG 저장탱크 면진해석방법을 제시하고자 한다.

## 2. 면진 이론

지반과 구조물사이에 설치된 면진장치는 지반을 통해서 전달되는 에너지를 차단 및 흡수한다. 이것은 상부구조물로 전달되는 에너지를 면진장치의 커다란 유연성에 의해서 상부구조물의 고유진동수를 증가시키며, 이력감쇠특성을 통해 에너지를 흡수한다. 교량과 같은 일반적인 구조물에서는 면진장치를 상부구조물과 연결된 구조부재로 간주하는 2-Degree of Freedom(DOF)를 갖는 선형시스템으로 이상화할 수 있다.

이와는 달리, 구조물의 유연성을 무시하고 2-DOF로 설계한 많은 액체저장구조물이 큰 피해를 입은 사례가 나온 후 구조물의 유연성을 고려한 액체저장구조물의 해석에 관한 연구가 Haroun<sup>1)</sup>과 Malhotra<sup>2)</sup> 등에 의해 많은 연구가 수행되었다. 특히, Malhotra는 액체저장탱크를 실제문제에 간편하게 적용할 수 있는 Fig. 1과 같은 모형의 3-DOF를 갖는 선형시스템으로 이상화시켜 해석하는 방법을 제시하였다.

전체구조물에서 상부구조물을 impulsive mode의 질량( $m_i$ )과 convective mode의 질량( $m_c$ )로 액체질량을 구분하고 면진시스템 위에 놓인 바닥층(base floor)의 질량을  $m_b$ 로 나타낸다. 질량의 절대변위를  $u_c, u_i, u_b$ 로 나타내고, 지반의 변위는  $u_g$ 로 나타낸다. 또한, 각각의 질량에 해당하는 상대변위  $\nu_c, \nu_i, \nu_b$ 는 아래와 같이 정의된다.

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

상대변위( $\nu_c, \nu_i, \nu_b$ )를 사용하여 3-DOF의 운동방정식을 구성하면 다음과 같다.

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

여기서,  $M = m_b + m_c + m_i$ 로 치환하고, 질량비  $\gamma_c = m_c/M$ ,  $\gamma_i = m_i/M$ 로 가정하면, 위 식을 아래 매트릭스 방정식으로 표현할 수 있다.

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -Mru_g \quad (3)$$

이 식을 고유진동수에 대한 특성방정식을 이용하여 면 식 4와 같이 정리할 수 있다.

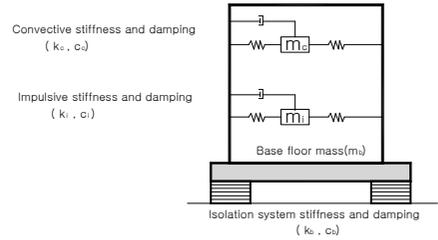


Figure 1 3-DOF Isolation system

$$\begin{aligned} (-1 + \gamma_c + \gamma_i)\omega^6 + [(1 - \gamma_c)\omega_i^2 + (1 - \gamma_i)\omega_c^2 + \omega_b^2]\omega^4 \\ - (\omega_b^2\omega_i^2 + \omega_b^2\omega_c^2 + \omega_c^2\omega_i^2)\omega^2 + \omega_b^2\omega_c^2\omega_i^2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)는  $\omega^2$ 에 대한 3차방정식으로 표현되고, 이 방정식의 해를 이용하면 3-DOF에서의 각각의 모드에 상응하는 고유진동수를 찾을 수 있다.

## 3. 면진 시스템

### 3.1 LRB(Lead-plug Rubber Bearing)

납면진받침은 저감쇠 고무받침과 유사한 적층고무받침이지만, 하나 혹은 두 개의 중공에 삽입된 납심을 갖고 있다. 받침에서 강판은 납심의 전단변형을 일으키게 만든다. 받침에서의 납은 약 10MPa의 응력흐름(flow stress)에서 물리적으로 변형을 할 수 있도록 되어 있다.

### 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 Bilinear 이력곡선은 하중(V)과 변위(u)의 관계를 통

해 그려지지만, FPB의 이력곡선은  $\tilde{V}$ 와 변위의 관계로 이루어 지는 것이 일반적이다.

여기서,  $\mu$ 는 마찰계수,  $R$ 은 마찰면의 곡률반경,  $W$ 는 전체중량이고,  $\tilde{V}(=V/W)$ 는 Normalized shear force 로 정의되어 진다.

(2) T-FPB<sup>3)</sup>

T-FPB는 Fig 3과 같이 4개의 곡률면( $R_1(2), R_2,$

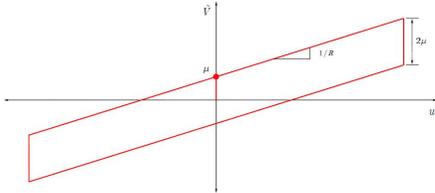


Figure 2 Idealized hysteresis loop of S-FPB

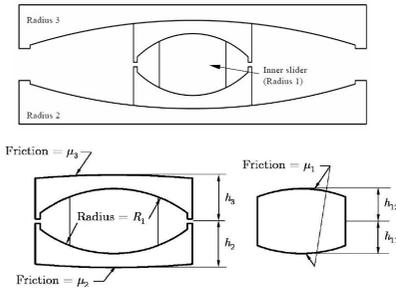


Figure 3 Parameters characterizing of T-FPB

$R_3$ )와 3개의 마찰계수( $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ )로 구성되어 있고, 이 곡률과 마찰계수의 특성은 지진 위험의 여러 수준을 고려하여 지진 격리된 구조의 성능을 최적화하기 위해 선택할 수 있게 설계되어야 한다.

또한, 유효진자길이  $L$ 은 아래와 같이 정의된다.

$$L_i = R_i - h_i \quad (5)$$

T-FPB의 이력거동을 이해하기 위해서는 마찰에 따른 수평변위의 거동을 파악해야 함으로 간단하게 정리하였다.

1) 수평변위의 단계

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

의 마찰계수를 초과할 때( $\tilde{V} > \mu_1$ ) 발생한다.

② Inner slider 변형과 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 변위 단계(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 변위 능력에 도달할 때까지 지속된다.

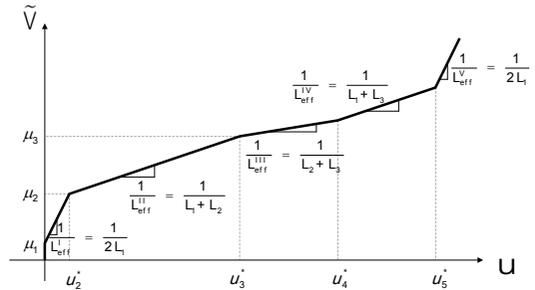


Figure 4 Idealized force-displacement relationship for T-FPB

2) 힘-변위 관계 구축

수평변위의 단계별 힘-변위의 관계를 설명하기 위해 각 단계에 대응하는 유효진자반경(effective pendulum radius)  $L_{eff}$ 을 이용하여, Fig 4와 같은 T-FPB의 이력곡선을 표현할 수 있다. 이것은 힘-변위 관계의 기울기를 결정하고, 이것을 유효진자길이(effective length)  $L_i$ 의 역수로 설정한다.

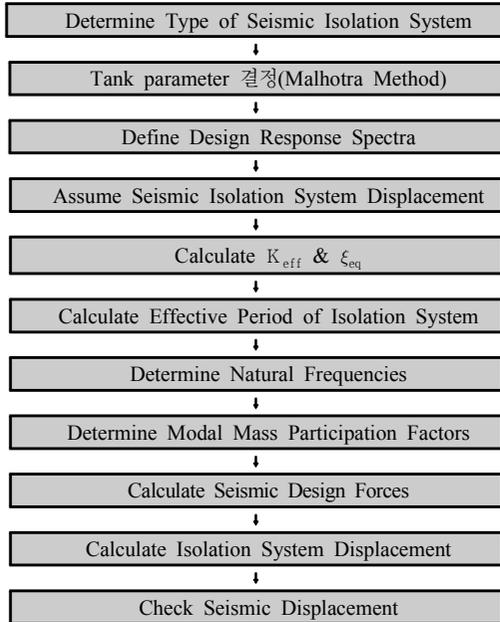
$$L_{eff} = \frac{\Delta u}{\Delta \tilde{V}} \quad (6)$$

$$L_i = R_i - h_i \quad (7)$$

4. LNG 저장탱크의 내진설계

#### 4.1 설계절차

앞서 연구된 Malhatra와 Haroun의 액체저장탱크의 내진설계 절차와 각국의 내진장치의 설계 절차<sup>4),5)</sup>를 참조하여, 본 연구에서는 아래와 같은 LNG Tank의 내진설계절차를 작성하였고, 이 설계절차 대로 적용사례를 통해 검증 작업을 적용해 보았다.



#### 4.2 적용사례

앞서 제시한 설계절차를 확인하기 위해 실제 설계되었던 멕시코 만자니오 LNG 저장탱크의 설계자료를 활용하여 해석하였다. 해석결과를 검증하기 위하여 수치해석(Beam-Stick Model) 결과와 비교하여 검증하였다.

##### (1) 멕시코 LNG Tank의 형상

멕시코 LNG 저장탱크는 Fig 5과 같은 원통형 저장탱크이고, 외조탱크와 내조탱크, 그리고 매트기초 슬래브와 면진장치로 구성되어 있다.

각 형상별 질량을 정리하면 다음과 같다.

- $m_l = 80,626.1 \text{ ton}$  ( $m_l = \text{LNG Liquid mass}$ )
- $m_{in} = 1,674 \text{ ton}$  ( $m_{in} = \text{내조탱크 질량}$ )
- $m_{out(wall)} = 16,354 \text{ ton}$ ,  $m_{out(roof)} = 12,066 \text{ ton}$   
( $m_{out} = \text{외조탱크 질량}$ )
- $m_{base} = 24282.47 \text{ ton}$  ( $m_{base} = \text{기초매트 질량}$ )

##### (2) 응답스펙트럼 해석

응답스펙트럼은 많은 지진기록으로부터 구한 평균 곡선을 사용하는 것이 좀더 합리적이므로, 본 응

답스펙트럼 해석은 U.S Atomic Energy Commission의 Regulatory Guide 1.60(이후 Reg. Guide 1.60)에서 제시한 응답스펙트럼을 사용하였다. Reg. Guide 1.60에서는 Ground acceleration이 1g 기준이므로, 본 연구에서는 0.3g 기준으로 변환하여 Fig 6과 같이 사용하였다.

내진설계를 아래와 같은 절차순서대로 풀이할 수 있다.

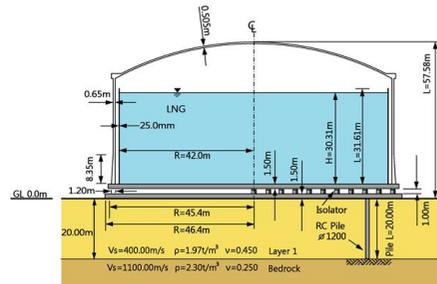


Figure 5 Shape of the LNG storage tank at Mexico

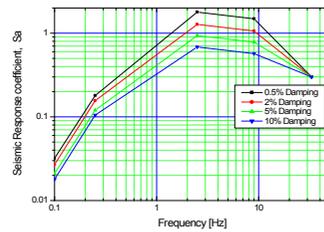


Figure 6 Seismic Response Spectrum

#### ①단계 : Determine Type of Seismic Isolation System

면진장치 Type은 Fixed System, LRB System, T-FPB system으로 나누어 해석하였다.

#### ②단계 : Tank parameter 결정

각 변수들은 Malhotra<sup>2)</sup>의 연구결과를 참조하여 결정하였다. 변수들은 저장탱크에 담긴 액체의 반지름과 높이의 비에 따라 결정되어지고, 본 연구에서 사용되어진 멕시코 LNG 탱크는 H/R=0.722이고, 이때의 Parameter값들을 이용하여 각 mode별 질량은  $m_c = 46,440.6 \text{ ton}$ ,  $m_i = 34,185.5 \text{ ton}$ 이고, 거리는  $h_i = 12.184$ ,  $h_c = 17.398$ ,  $h'_i = 29.946$ ,  $h'_c = 30.128$  이다.

#### ③단계 : Define Design Response Spectra

응답스펙트럼은 실제 설계지역에서의 스펙트럼을 사용해야 하나, 본 연구에서는 앞서 제시한 Fig 6의

응답스펙트럼을 사용하였다.

④단계 : Assume Seismic Isolation System

Displacement

(a) Fixed System

면진장치가 없으므로 변위는 0(m)으로 가정된다.

(b) LRB System

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

(c) FPB system

멕시코 LNG 탱크를 실제 설계자료의 변위값인 0.254m로 가정하였다.

⑤단계 : Calculate  $K_{eff}$  &  $\xi_{eq}$

(a) Fixed System

Fixed System 구조물은 면진장치가 없으므로  $K_{eff}$ 와  $\xi_{eq}$ 는 고려할 필요가 없다.

(b) LRB System

LRB에서는 아래 식과 같이 유효강성( $K_{eff}$ )과 유효감쇠( $\xi_{eq}$ )와 같은 면진장치의 특성값들은 Table 1에 나타내었다.

(c) FPB system

FPB 면진장치의 특성을 반영하는 특성값들은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Isolation system parameters of LRB

	$d_m$ (m)	$K_{eff}$ (kN/m)	$\xi_{eq}$ (10%)	$Q_d$ (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)	$\xi_{eq}$ (10%)	$\mu$	$Q_d$ (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

⑥단계 : Calculate Effective Period of Isolation System

System

Impulsive와 Convective mode의 주기( $T_{imp}$ ,  $T_{con}$ )는 Malhotra의 방법을 참조하였고, 구조물과 면진장치의 주기( $T_{out}$ ,  $T_{isol}$ )는 가정하였다.

⑦단계 : Determine Natural Frequencies

식 4의 방정식을 이용하여 각 mode별 고유진동수를 구할 수 있다.

⑧단계 : Determine Modal Mass Participation Factors

Factors

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

⑨단계 : 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.

$$V_u = m_i \times S_a(T_i) \quad (8)$$

$$M_u = m_i \times S_a(T_i) \times h_i \quad (9)$$

여기서,  $m_i$  : mode별 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.

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

$$M_b = m_i \times S_a(T_i) \times h'_i \quad (11)$$

여기서,  $h'_i$  : 각 질량과 면진장치아래까지 거리

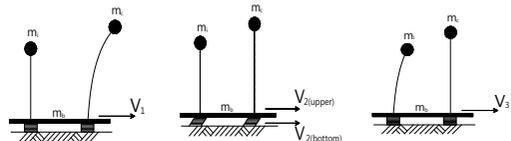
(b) Isolation System(LRB and FPB 동일)

면진장치에서의 각 mode별 힘의 거동은 Fig 7과 같이 단순화시킬 수 있다. 이 때 mode별 설계지진력 산정하면 다음과 같다.

$$V_1 = C_{s1} \times M \times 1^{st} \text{ Mode 질량참여율} \times g$$

Table 3 Period&Response Spectrum coefficient

		Fixed	면진	
			LRB	FPB
주기	$T_{imp}$ (sec)	0.608	0.608	0.608
	$T_{con}$ (sec)	10.330	10.330	10.330
	$T_{isol}$ (sec)	-	1.43	2.94
응답스펙트럼계수	$S_a(T_{imp})$ (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
질량참여율	1 Mode(%)	-	35.28	38.21
	2 Mode(%)	-	63.45	61.72
	3 Mode(%)	-	1.27	0.07



(a) 1<sup>st</sup> Mode (b) 2<sup>nd</sup> Mode (c) 3<sup>rd</sup> Mode

Figure 7 Simple model of the LNG storage tank

$$V_2 = C_{s2} \times M \times 2^{\text{nd}} \text{ Mode 질량참여율} \times g$$

$$V_3 = C_{s3} \times M \times 3^{\text{st}} \text{ Mode 질량참여율} \times g \quad (11)$$

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

$$V_u = V_1 + V_{2(\text{upper})} + V_3 \quad (12)$$

$$M_u = V_i \times h_i \quad (13)$$

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

$$V_b = V_u + V_{2(\text{bottom})} \quad (14)$$

$$M_b = V_i \times h' \quad (15)$$

#### ⑩단계 : Calculate Isolation System Displacement

Pseudo-displacement를 통해 면진장치의 변위를 산정할 수 있다.

#### ⑪단계 : Check Seismic Displacement

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

#### (3) 시간이력 해석 (Beam Stick Model)

시간이력해석은 SAP 2000 프로그램을 Beam - Stick Model로 해석하였다. 시간이력 해석을 위한 인공지진파는 Reg. Guide 1.60<sup>7)</sup>의 응답스펙트럼으로 인공지진파를 만들어 적용하였다<sup>8)</sup>.

#### (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)과 비선형(Bi-Linear)로 구분하여 해석하였고, 응답스펙트럼해석시 결과와는 Eq. Linear가 거의 동일한 변위값으로 나타났다.

##### ② 최대 지진력 비교

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

시간이력해석은 Fixed일 경우와 면진장치를 사용했을 경우 이력곡선을 선형(Eq-Linear)으로 가정했을 경우와 비선형(Bi-Linear)로 가정했을 경우를 구분하여 해석하였다.

**Table 4** Displacement of isolation system

면진장치	Response Spectrum Analysis	Time History Analysis	
		Eq. Linear	Bi-Linear
LRB	0.120(m)	0.119(m)	0090(m)
FPB	0.254(m)	0.258(m)	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 LRB	Fixed	Isolation	
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 LRB	Fixed	Isolation	
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

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 수학적 모델을 제시하였다. 이러한 내진절

차방법을 통해 실제 설계되었던 멕시코 LNG 저장탱크를 통해 해석한 결과 본 논문에서 제시한 해석법(응답스펙트럼 해석법)과 일반적으로 활용도가 높은 Beam-Stick Model을 이용한 시간이력 해석을 비교·분석한 결과 유사한 결과를 나타냄으로 본 연구에서 제시한 내진설계절차가 유용함을 알 수 있었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- (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 Wenk., 2000, Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks, Structural Engineering International, pp. 197~201.
- (3) Morgan, T.A., and Mahin S.A., 2010, Achieving reliable performance enhancement using multi-stage friction pendulum isolators, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 1443~1461.
- (4) AASHTO, 1999, Guide Specifications for Seismic Isolation Design, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- (5) ASCE Standard, 1999, Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98, ASCE
- (6) U. S. Atomic Energy Commission , 1973, Regulatory Guide 1.60.
- (7) Jeon, B. G., Jang, S. J., Kim, N, S., 2011, Seismic Performance Evaluation of Cone-type Friction Pendulum Bearing System Using Shaking Table Test, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No.7, pp. 559~608.