마찰재 물성변화에 따른 마찰진자시스템을 적용한 LNG 탱크의 지진취약도 분석

문 지 훈¹ · 김 지 수¹ · 이 태 형² · 한 동 석^{1*}

¹연세대학교 토목환경공학과, ²건국대학교 인프라시스템공학과

Seismic Fragility Analysis of a LNG Tank with Friction Pendulum System of Various Friction Coefficient

Ji-Hoon Moon¹, Ji-Su Kim¹, Tae-Hyung Lee² and Tong-Seok Han^{1*}

¹Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

²Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

Abstract

The friction pendulum system(FPS) is a kind of seismic isolation devices for isolating structures from an earthquake. To analyze the effect of friction materials used in the friction pendulum system, fragility analysis of LNG tank with seismic isolation system was conducted. In this study, titanium dioxide(TiO₂) nanoparticles were incorporated into polyvinylidene fluoride(PVDF) matrix to produce friction materials attached to the FPS. The base moment of the concrete outer tank and the acceleration of the structure were evaluated from different mixing ratios of constituents for the friction materials. The seismic fragility curves were developed based on two types of limit state. It is confirmed that evaluation of combined fragility curves with several limit states can be applied to select the optimum friction material satisfying the required performance of the FPS for various infrastructure.

Keywords : friction pendulum system(FPS), friction material, LNG tank, PVDF, TiO₂, seismic fragility, simulation

1. 서 론

최근 지진으로 인한 사회기반시설물의 피해가 증가하고 있으며 세계적으로 친환경 에너지의 관심과 수요가 증가함에 따라 LNG 탱크의 안전성 확보가 중요시되고 있다. 지진으로 인한 피해를 줄이기 위하여 면진장치에 대한 연구가 지속적으로 진행되어져 왔으며 이를 LNG 저장탱크에 적용한 연구 또한 수행되고 있다.

면진장치 종류 중 하나인 마찰진자시스템(FPS: friction pendulum system)은 마찰면 곡률의 변경을 통해 구조물의 고유주기를 비교적 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있으며 이 곡률은 지진 하중 작용시 중력에 의해 복원력을 가지게 하는 특징이 있다(Zayas *et al.*, 1990). 또한 구면의 곡률반지름과

마찰재의 마찰계수 변화에 따라 면진장치 성능에 영향을 미친다(Constantinou *et al.*, 2007).

실제 사용 환경에서의 면진받침은 온도와 상재하중, 속도 등에 따라 마찰재의 마찰계수가 변한다(Constantinou *et al.*, 1990). Constantinou(2007)는 스테인리스 스틸을 피 마찰재로 하였을 때 보편화되어 있는 PTFE 마찰재의 운동 마찰계수를 온도와 속도 변화에 따라 측정하였다. Constantinou(2007)의 마찰계수 측정 결과에 따르면 시험 환경 20℃에서 평균 속도 이상의 운동마찰계수는 변화가 미비하기 때문에 본 연구에서는 마찰진자시스템의 마찰계수 선정 시에 Coulomb의 이론을 적용하였다. Coulomb의 이론에 따르면 마찰진자시스템의 중요 설계요소인 마찰계수는 지진으로 인하여 평균 속도 이상에서 거동한다고 가정하였을 때에 사용 환경의 속도와

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-5801; E-mail: tshan@yonsei.ac.kr

Received September 21 2016; Revised January 18 2017;

Accepted February 8 2017

© 2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가해지는 하중에 영향을 받지 않고 일정한 값을 사용할 수 있다 (Wu *et al.*, 1986).

본 연구에서는 불소수지(PVDF: polyvinylidene fluoride)와 나노 파우더(TiO₂: titanium dioxide)의 배합을 통해 새로운 마찰재를 제작하고 물성시험을 수행하였다. 물성시험을 통해 얻은 물성치 가운데 마찰진자시스템의 주 설계 요소 중 하나인 마찰재의 마찰계수를 재료의 배합비별로 적용하여 연구를 진행한다. 이를 통하여 서로 다른 배합비를 가지는 마찰재의 마찰계수를 적용한 마찰진자시스템의 면진 성능을 분석할 수 있다. 구조물의 거동 분석은 지진 발생 시 기반시설 해석 전용 프로그램인 OpenSees(Mckenna *et al.*, 2000)를 이용해 모델링한 LNG 탱크를 사용하였다. 최종적으로 LNG 탱크의 안전성 평가를 위하여 마찰재 물성변화에 따른 지진취약도 분석을 진행하였다.

2. 마찰재 제작과 LNG 탱크 모델링

2.1 마찰진자시스템의 원리

마찰진자시스템(FPS)은 납-고무 면진받침(LRB: lead rubber bearing)이 재료의 탄성으로 복원력을 가지는 것과는 다르게 면진장치의 곡률반지름에 따른 진자운동을 통하여 복원력을 가진다. 마찰진자시스템이 곡률에 따라 거동하며 생기는 마찰재와 받침 사이의 마찰력이 지진에 의해 감쇠작용을 하게 된다. Fig. 1는 마찰계수를 주요 설계요인으로 하는 마찰진자시스템의 구성 원리를 나타낸 것으로, 수평 방향력 F 는 0일 때 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

Fig. 1 Operation of friction pendulum isolator
(note: θ is the angle of FPS, R is the radius of curvature, W is the supported weight, F is the resisting force, F_f is the friction force and u is the lateral displacement from the center of the FPS connection.)

$$F = \frac{W}{R \cos \theta} u + \frac{\mu W}{\cos \theta} \frac{W}{R} u + \mu W \text{sign}(\dot{u}) \quad (1)$$

여기서, F 는 수평 방향력, W 는 구조물의 수직 재하하중, u 는 수평변위, $\dot{u}$ 은 수평 방향속도, μ 는 마찰계수, R 은 마찰면의 곡률반지름을 나타낸다.

마찰진자시스템의 고유주기는 오직 면진받침이 가지는 곡률 반지름에만 관계가 있다. 면진되는 구조물의 질량과는 무관하기 때문에 면진받침 설계 시 원하는 고유주기를 설정하기 유리하다는 장점을 가지고 있다. 고유주기 T 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2)$$

여기서, R 은 곡률반지름, g 는 중력가속도이다.

본 연구에서 LNG 탱크 거동분석에 적용한 마찰진자시스템의 고유주기 T 는 분석에 사용된 20개 지진하중의 평균 응답 가속도의 최대값을 피할 수 있도록 장주기화하여 2sec로 선정하였다. 분석에 적용한 마찰진자시스템의 곡률반지름 R 은 고유주기 2sec에 맞추어 식 (2)에 의해 1m로 설정하였다.

2.2 마찰재 시편의 제작 및 물성시험

재료의 배합비에 따라 마찰재의 물성을 바꿀 수 있는 마찰진자시스템을 고안하기 위하여 PVDF와 TiO₂의 배합을 통해 마찰재를 제조하였다. 시편 종류는 총 5개로, 나노필러로 사용되는 TiO₂ 함량 증가에 따라 제작 마찰재의 물성 변화를 확인하기 위하여 TiO₂ 함량을 0%, 10%, 20%, 30%, 40%로 나누어 제작하였다. 각 배합비별로 마모, 마찰계수, 밀도시험을 위해 각각의 물성시험 기준에 따라 다른 크기로 제작하였다.

마모시험은 KS M ISO 9352 기준에 준하여 Taber 사의 마모시험기(abrasion tester)로 플라스틱과 연마면에 의한 내마모성을 측정하였으며 밀도는 ASTM D792 기준에 준하여 전기밀도계(electronic densimeter)로 비중 측정 후 밀도를 환산하였다. 마찰계수는 ASTM D1894 기준에 준하여 25±2℃의 시험환경에서 측정하였다. 본 연구의 마찰계수시험은 계측기기 제원의 한계로 인해 구조물의 자중을 고려하지 않았다. 대신 현재 마찰진자시스템의 마찰재로 상용되고 있는 고성능의 초고분자량 폴리에틸렌(UHMW-PE: ultra-high molecular weight polyethylene) 시편에 대하여 본 연구에서 진행한 시험과 동일한 물성시험을 진행하였다. 제작한 마찰재 시편의 물성치와 고성능 UHMW-PE 시편의 물성치 비교를 통해 본 연구에서 제작한 마찰재의 사용성을 확인할 수 있었다. 물성

Table 1 Mechanical properties of friction materials

Sample	Taber abrasion test (mass loss rate, %)	Friction coefficient(-)		Density (g/cm ³)
		Static	Dynamic	
PVDF	0.03	0.36	0.32	1.771
PVDF+TiO ₂ 10%	0.07	0.30	0.27	1.854
PVDF+TiO ₂ 20%	0.12	0.29	0.24	1.930
PVDF+TiO ₂ 30%	0.14	0.23	0.17	2.007
PVDF+TiO ₂ 40%	0.22	0.25	0.19	2.005
UHMW-PE	0.09	0.11	0.07	0.93

Fig. 2 Cracks of PVDF/nano-TiO₂ specimens with nano-TiO₂ loadings of 40% by weight

시험을 통하여 얻은 PVDF와 TiO₂ 배합비에 따른 마찰재 시편과 UHMW-PE 시편의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

마찰재 시편 제작에 사용한 PVDF 파우더의 밀도는 1.74 g/cm³이고, TiO₂ 파우더의 밀도는 4.23g/cm³이기 때문에 TiO₂ 함량이 증가할수록 마찰재 시편의 밀도는 증가하여야 한다. Table 1에서 TiO₂ 함량이 30%일 때 까지는 마찰재 시편의 밀도가 정상적으로 증가하다가 40%에서는 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Table 1에서 TiO₂ 함량이 40%인 경우 질량손실률(mass loss rate)이 급등하고 마찰계수의 경우에는 반등하는 것을 확인할 수 있다.

물성치 결과는 나노필러로 사용한 TiO₂ 함량이 40% 이상이 될 경우 TiO₂가 PVDF로부터 분리되고, 인력이 강한 TiO₂ 간의 응집이 이루어지기 때문이다. Fig. 2와 같이 TiO₂ 함량이 40%인 마찰재 시편에 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있다. TiO₂ 함량이 40%인 마찰재 시편이 외부 균열없이 제작된 경우에도 밀도는 감소되고 질량손실률은 급등하며 마찰계수는 반등하는 것을 확인하였다. 이는 TiO₂의 자체적인 응집으로 인한 보이지 않는 내부 균열과 공극 발생의 결과로 사료된다. 이러한 물성시험의 결과를 바탕으로 TiO₂ 함량이 40% 이상이 될 경우 마찰재의 내부 및 외부 균열때문에 안정성이 불확실해짐을 확인하였다. 따라서 마찰진자시스템의 면진 성능 분석을 위하여 마찰재 시편의 TiO₂ 함량을 0%에서

30%까지로 선택하였다. 세 가지 물성시험 결과 중 FPS의 중요 설계요소인 마찰계수를 LNG 탱크의 지진취약도를 분석에 사용하였다.

2.3 마찰진자시스템의 해석모델

LNG 탱크에 대한 거동과 지진취약도 분석을 위하여 적용한 마찰진자시스템은 실제로 비선형 거동을 하지만 일반적으로 이선형(bilinear)모델로 단순화하여 나타낸다(Naeim *et al.*, 1999). 본 연구에서 LNG 탱크를 단순화하여 모델링하였기 때문에 마찰진자시스템의 거동을 단순화한 이선형모델을 사용하였다. 이선형모델은 Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 1차 강성(K_u)과 2차 강성(K_d)로 나타낼 수 있으며 각각의 값은 식 (3)과 식 (4)로 정의한다.

$$K_u = \frac{\mu W}{D_y} = \frac{F_f}{D_y} \quad (3)$$

$$K_d = \frac{W}{R} \quad (4)$$

여기서, D_y 는 항복변위, F_f 는 곡률 방향성을 고려한 마찰계수이다. 식 (4)로부터 곡률 R 이 커지면 2차 강성(K_d)은 줄어드는 것을 알 수 있다. 평균응답 가속도를 고려하여 선정된 고유주기 2sec를 통해 계산된 곡률반지름(R)인 1.0m를 선택하였다. 이를 바탕으로 식 (4)로부터 2차 강성(K_d)을 4.96×10^5 kN/m로 선정하였다.

마찰계수를 변수로 가지는 1차 강성(K_u)은 본 연구에서 제작한 마찰재의 마찰계수를 사용하여 계산하였다. 1차 강성(K_u)의 값은 2차 강성(K_d)보다 최소 51배 이상으로 선정

Fig. 3 FPS bearing bilinear force-displacement relationship

(note: F_f is the friction force, K_u is the elastic stiffness, K_d is the post-yield stiffness and D_y is the yield displacement.)

Table 2 Post-yield stiffness of FPS

Post-yield stiffness (kN/m)	Weight ratio of TiO ₂			
	0% (Neat PVDF)	10%	20%	30%
	4.67×10^7	3.94×10^7	3.50×10^7	2.48×10^7

하도록 권유하고 있다(Naeim *et al.*, 1999). 따라서 제작한 마찰재의 마찰계수를 사용하여 식 (3)으로 계산되는 1차 강성 (K_1)이 2차 강성(K_2)보다 최소 51배 이상이 되도록 항복 변위(D_y)를 가정하였다. 본 연구에서 제작한 마찰재의 TiO₂의 함량별 마찰계수를 적용한 마찰진자시스템의 1차 강성(K_1)은 Table 2에 나타내었다.

2.4 연진된 LNG 탱크의 구조해석 모델

본 연구에서는 Lee 등(2013)이 모델링한 국내 P생산 기지의 LNG 탱크를 상부 구조물로 선택하였다. LNG 탱크는 기본적으로 콘크리트 외조, 철재 내벽 및 충격하중을 발생시키는 액화 천연가스(LNG: liquified natural gas)로 구성된다. LNG 탱크는 지진 하중 발생 시 내부 액화천연가스(LNG)의 거동을 고려한 벽체구조물의 연구가 진행되어 왔다(Housener, 1963). Table 3은 본 연구에서 사용한 LNG 탱크의 규격을 나타내며 이와 같은 재원을 가진 LNG 탱크의 지진하중에 대한 거동분석과 지진취약도 분석을 위하여 많은 연구에서 사용되는 튜닝 포크 모델(tuning-fork model)을 사용하였다(Haroun *et al.*, 1981). 튜닝 포크 모델은 Fig. 4와 같이 LNG 탱크의 외조와 내조를 캔틸레버 형식으로 모델링하였다. 액화천연가스 질량은 충격 및 대류현상에 대한 효과를 단순화하기 위하여 LNG 탱크의 내조와 유효강성 스프링으로 연결하였다(Housener, 1963; Kim, 2016).

지진하중에 의한 LNG 탱크의 정확한 거동 분석을 위해서 벽체의 경우 콘크리트 외조와 철재 내조를 모두 고려해야 한다. 그러나 철재 내벽의 경우 강재로 되어있어 상당한 강진에도 파괴되지 않으며 외조와 내조사이에 상당한 거리를 두고 거동한다. 따라서 LNG 탱크의 철재 내조를 모델링하여 LNG 탱크 구조물에는 반영하였으나 거동 분석과 지진취약도 분석은 진행하지 않았다. 본 연구에서는 LNG 탱크의 콘크리트 외조와 마찰진자시스템에 대한 거동 분석과 지진취약도 분석을 진행

Table 3 Dimensions of the LNG tank

Structural component	Dimension
Wall height of inner tank	31.62m
Wall height of outer tank	35.40m
Height of dome peak	10.03m

Fig. 4 Tuning-fork model of LNG tank

하였다. 분석에 사용한 LNG 탱크는 OpenSees 프로그램으로 모델링되었다.

3. FPS 마찰계수 변화에 따른 LNG 탱크의 지진취약도 분석

3.1 입력 지진파

마찰재의 마찰계수를 적용한 마찰진자시스템의 지진하중에 대한 거동분석과 지진취약도 분석을 위해 본 연구에서는 Lee 등(2003)이 선정한 임의의 지반가속도 기록 20개를 이용하였다. 본 연구에서 선정한 수평방향 지반가속도는 PEER(pacific earthquake engineering research) Center의 Testbeds Program을 이용하여 수집되었다. Fig. 5는 수평방향 지반가속도 20가지의 응답 가속도 그래프이며, 이 그래프에서 굵은 붉은 선은 응답스펙트럼의 평균값을 나타낸다. 구조물의 목표 주기는 Fig. 5의 응답스펙트럼의 평균값 중 가속도가 최대인 구간을 피하여 2sec로 설정하고, 마찰진자시스템(FPS)의 곡률반지름을 결정하는데 사용하였다.

Fig. 5 Acceleration response spectra of accelerations (note: the red bold line represents the average response spectrum)

본 연구에서는 마찰진자시스템에 의해 면진된 구조물의 거동 분석과 지진취약도 분석을 위하여 선정된 20개의 수평방향 지반가속도를 조정하여 사용하였다. 선정된 수평방향 지반가속도에 대해 각각 최대지반가속도(PGA: peak ground acceleration)를 기준으로 0.1g부터 0.1g 간격으로 증가시켜 2.0g까지 총 20개의 지반가속도로 조정하였다. 최대지반가속도 기준으로 크기를 조정된 수평방향 지반가속도 20개를 사용하여 LNG 탱크의 지진취약도 분석을 진행하였다.

3.2 마찰재의 마찰계수를 적용한 구조물 응답 분석

마찰재의 마찰계수에 의한 마찰진자시스템의 면진성능평가를 위해서 20개의 지진기록 중 하나를 선택 후 최대지반가속도를 1.0g로 조정하여 LNG 탱크의 거동을 비교·분석하였다. 선택한 지진기록은 1980년 1월 17일 Livermore에서 발생

Fig. 6 Input ground motion(Livermore, 1980)

(a) Relative Acceleration of top node of outer tank

(b) Moment of base node of outer tank

Fig. 7 Comparison of responses of FPS and LNG tank for the case of highest friction coefficient(TiO₂ 0%) and the lowest friction coefficient(TiO₂ 30%)

하였으며 시간 이력 그래프는 Fig. 6과 같다.

Livermore 지진하중에 대한 LNG 탱크의 콘크리트 외조 최상단의 시간-가속도 그래프, 최하단부의 시간-모멘트 그래프는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서는 가장 높은 마찰계수($\mu=0.32$)를 가지는 PVDF로만 제작한 마찰재 시편과 가장 낮은 마찰계수($\mu=0.17$)를 가지는 PVDF와 TiO₂ 30% 배합비를 가지는 마찰재 시편의 물성을 마찰진자시스템에 적용하여 분석하였다.

Fig. 7(a)에서 TiO₂가 0% 일 때 콘크리트 외조 최상단부의 최대 가속도는 2.10g이며, TiO₂가 30% 일 때 최대 가속도는 1.45g이다. PVDF를 matrix로 하여 TiO₂가 30%의 배합비를 가지는 마찰재를 사용하였을 때 최대 가속도는 30.86%의 응답 감소를 나타내었다. Fig. 7(b)에서 TiO₂가 0%일 때 콘크리트 외조 하단부 최대 모멘트는 237.70MN-m이며, TiO₂가 30% 일 때 최대 모멘트는 125.28MN-m이다. 콘크리트 외조 하단부의 모멘트 응답의 경우 TiO₂가 30%인 배합비의 마찰재를 사용하였을 때 최대 모멘트는 47.30%의 감소를 나타내었다. 이를 통하여 가장 작은 마찰계수 값을 가지는 TiO₂ 30% 배합비의 마찰재를 사용하였을 때 LNG 탱크의 응답이 전체적으로 저감되는 것을 알 수 있다.

또한 최대지반가속도를 1.0g으로 조정된 20개 지진하중에 대해 콘크리트 외조 가장 윗부분의 상대 수평변위를 고속 푸리에 변환(FFT)을 이용하여 분석하였다. Fig. 8에서 제작 마찰재의 물성치가 적용된 면진된 LNG 탱크의 주파수 응답을 통해 구조물의 주기가 목표주기인 2sec에 근접한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 FPS에 의해 면진된 LNG 탱크가 목표한 주기에 부합하는 것을 확인하였다.

Fig. 8 FFT of relative displacement of top node of outer tank for the lowest friction coefficient(Twenty earthquakes scaled by 1.0g PGA)
(note: the red bold line represents the average fourier amplitude spectrum)

3.3 LNG 탱크의 지진취약도 분석

지진취약도 함수는 구조물의 위험도를 평가하는 보편적인 방법으로 알려져 있다(O'Rourke *et al.*, 2000). 본 연구에서는 Shinozuka(2000)의 최우도추정법에 의한 지진취약도 함수를 사용하였다. Shinozuka의 지진취약도 함수는 최우도함수(maximum likelihood function)를 정의하는 방법에 따라 세 가지로 나뉘지만 Shinozuka의 연구 결과를 따르면 해석결과의 차이는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 구조물이 지진에 의해 손상이 발생하는 경우에는 손상확률을 증가시키고, 손상이 발생하지 않는 경우에는 손상확률을 감소시키도록 하는 최우도 함수를 사용하였다.

지진취약도 함수 a_i 는 식 (5)과 같이 대수정규분포함수를 정의되며 최우도함수는 아래 식 (6)으로 정의된다.

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln a_i}{c} \right] \quad (5)$$

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{(1-x_i)} \quad (6)$$

여기서, $F(\)$ 는 지진취약도 함수, $\Phi(\)$ 는 정규분포함수, a_i 는 i 번째 구조물에 작용하는 지진의 최대지반가속도 값, c 는 대수정규분포함수의 중간값, ζ 는 대수정규분포함수의 표준편차, N 은 지진취약도 분석에 사용된 구조물의 수, x_i 는 입력 지진에 대한 구조물의 손상 여부(손상이 발생한 경우 $x_i=1$, 손상이 발생하지 않은 경우 $x_i=0$)를 의미한다.

본 연구에서는 마찰재의 재료 배합비에 따른 지진취약도를 분석하기 위하여 한계상태를 두 가지로 선정하였다. 각 한계상태는 LNG 탱크 콘크리트 외조의 하단부 모멘트와 마찰진자시스템의 상대 수평변위로 지정하였다. 본 연구에서 사용한 국내 P생산지지의 면진되지 않은 LNG 탱크의 경우 0.2g의 설계지진하중에 대해 내진설계가 되어있다. 따라서 한계상태 설정을 위해 구조물 해석에 사용한 20개 지진하중의 최대지반가속도를 구조물의 설계지반 가속도인 0.2g으로 조정하였다. 조정한 20개 지진하중에 의해 발생하는 고정된 LNG 탱크의 콘크리트 외조 하단부 모멘트 평균값을 구조물의 한계상태로 지정하였다. 해당 한계상태를 통해 마찰계수별 마찰진자시스템의 지진취약도 뿐만 아니라 마찰진자시스템으로 면진된 구조물의 지진취약도 또한 확인할 수 있다.

마찰진자시스템의 파괴는 면진의 기능을 상실하는 것을 의미한다. 이로 인해 마찰진자시스템의 상대 수평변위를 한계상태로 선정하였으며 AASHTO(2010)에서 제시한 기준에

의해 곡률반지름(R) 1m의 0.2배인 0.2m($0.2 \times R$)를 한계상태로 설정하였다. HAZUS에 LNG 탱크에 대한 손상기준이 제시되어 있지만 본 연구에서는 마찰진자시스템에 적용하는 마찰계수의 변경에 따른 구조물의 지진취약도를 비교하고, 최적의 마찰재 선정을 위한 방법론 제시를 목표로 하고 있다. 따라서 면진 되지 않은 고정된 LNG 탱크 콘크리트 외조의 하단부 모멘트와 마찰진자시스템의 상대 수평변위를 한계상태로 설정하여 구조물의 지진취약도를 분석하였다.

Fig. 9는 본 연구에서 서로 다른 배합비에 따라 제작한 마찰재의 마찰계수를 적용하여 각각의 한계상태별로 나타난 지진취약도 곡선이다. Fig. 9(a)는 고정된 LNG 탱크의 콘크리트 외조 하단부 모멘트를 한계상태로 설정한 지진취약도 곡선이다. 목표 주기에서 마찰진자시스템에 적용한 마찰재의 TiO_2 배합비가 증가하여 마찰계수가 작아질수록 구조물 하단부 모멘트에 대한 안정성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 마찰진자시스템의 상대 수평변위를 한계상태로 설정한 지진취약도 곡선이다. Fig. 9(a)와는 반대로 마찰재의 TiO_2 배합비가 증가할수록 마찰진자시스템의 상대 수평변위에 대한 안정성이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 마찰재의 마찰계수가 작다고

(a) Limit state: base moment

(b) Limit state: lateral displacement of FPS

Fig. 9 Fragility curves of LNG tanks

해서 반드시 면진성능이 개선되고 구조물의 안전성이 높아지는 것을 의미하진 않는다. 마찰재의 배합비별 파괴확률이 크게 차이나는 않지만 마찰진자시스템의 파괴는 면진성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 고려해야 한다. 본 연구에서 고려한 두 가지 한계상태에 따른 상반된 지진취약도 분석의 결과로부터 제작한 마찰재의 마찰계수의 최적 배합비를 결정하기 위해서는 LNG 탱크가 손상될 수 있는 다양한 한계상태를 고려하여야 정확한 분석이 가능한 것을 알 수 있다. 취약도 곡선의 조합을 바탕으로 최적의 마찰재를 선정하는데 지진취약도 분석 방법이 활용될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 PVDF와 TiO_2 의 배합비에 따른 마찰재를 이용하여 마찰진자시스템(FPS)의 마찰계수 변화를 통해 LNG 탱크의 응답특성과 지진취약도를 분석하였다. 마찰재의 물성 분석 시험을 통해 TiO_2 배합비가 30%까지 증가할 경우 마찰계수가 감소하는 경향을 확인하였다. 마찰재의 마찰계수가 가장 큰 TiO_2 배합비 0%와 마찰계수가 가장 작은 TiO_2 배합비 30%를 적용한 LNG 탱크를 비교해 보면 LNG 탱크 콘크리트 외조의 상대가속도와 모멘트 응답에서 큰 차이를 확인할 수 있다. 콘크리트 외조 최상부의 가속도의 경우 30.86%의 응답 감소를 나타내며 콘크리트 외조 하단부의 모멘트의 경우 47.30%의 응답 감소를 확인하였다.

구조물의 지진취약도 경우 한계상태를 하단부 모멘트로 설정하였을 때는 TiO_2 의 배합비가 30%까지 증가할수록 점점 파괴확률이 줄어든다. 마찰진자시스템의 상대 수평변위를 한계상태로 하였을 때는 그 반대의 결과를 확인하였다. 배합비별로 파괴확률의 큰 차이는 없지만 면진성능에 직접적인 영향을 미치므로 반드시 두 가지의 한계상태를 모두 고려해야 한다.

한계상태별 지진취약도 곡선의 서로 다른 파괴확률에서 알 수 있듯이 한 가지 한계상태만 고려한 구조물의 안전성 평가는 신뢰성을 확보하기 힘들다. 따라서 높은 신뢰성을 가지는 구조물 안전성 평가를 위한 지진취약도 분석과 각각의 한계상태별 취약도 곡선의 조합을 통한 최적의 마찰재 선정을 가능하게 하는데 본 연구에서 제시한 방법론이 활용될 수 있다. 또한 PVDF와 TiO_2 의 배합비에 대한 데이터베이스 구축을 통해 다양한 구조물에 적용되는 마찰진자시스템의 요구 성능을 만족하는 최적의 마찰재 선정이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아(NRF-2012R1A1A

2006629, NRF-2014R1A2A2A09052374 및 NRF-2015 K1A3A1A59073929) 수행되었습니다.

References

- AASHTO (2010) *Guide Specification for Seismic Isolation Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, p.47.
- ASTM (2014) *D 1894 Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting*, ASTM International, West Conshohocken, p.7.
- Buckle, I.G., Constantinou, M.C., Dicleli, M., Ghasemi, H. (2006) Seismic Isolation of highway Bridges, Special Report MCEER-06-SP07, MCEER, New York, p.194.
- Constantinou, M., Mokha, A., Reinhorn, A. (1990) Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling, *J. Struct. Eng.*, 116(2), pp.455~474.
- Constantinou, M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y., Fenz, D.M., Warn, G.P. (2007) Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading, Technical Report MCEER-07-0012, MCEER, New York, p.471.
- Haroun, M.A., Housner, G.W. (1981) Seismic Design of Liquid Storage Tanks, *J. Tech. Coun. of ASCE*, 107(1), pp.191~207.
- Housener, G.W. (1963) The Dynamic behavior of Water Tanks, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 53(2), pp.381~387.
- Kim, J.S. (2016) Fragility Analysis of LNG Storage Tank with Seismic Isolation Systems (Master dissertation), Yonsei University, Seoul, Korea.
- Lee, T.H., Mosalam, K.M. (2003) Sensitivity of Seismic Demand of a Reinforced Concrete Shear-wall Building, In Ninth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering(ICASP9), San Francisco, pp.1511~1518.
- Lee, T.-H., Kwon, S., Park, H.-S. (2013) Development of Seismic Fragility Functions of LNG Storage Tanks by an Analytical Method, *J. KOSHAM*, 13(1), pp.89~95.
- McKenna, F., Fenves, G. L., Jeremic, B., Scott, M. (2000) *Open System for Earthquake Engineering Simulation*, URL <http://opensees.berkeley.edu>.
- Naeim, F., Kelly, J.M. (1999) Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, *John*

- Wiley & Sons.*
- O'Rourke, M.J., So, P.** (2000) Seismic Fragility Curves for On-grade Steel Tanks, *Earthq. Spectra*, 16(4), pp.801~815.
- PEER Center** (2011) Users Manual for the PEER Ground Motion Database Web Application, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, URL <http://peertestbeds.net>.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., Naganuma, T.** (2000) Statistical Analysis of Fragility Curves, *J. Eng. Mech.*, 126(12), pp.1224~1231.
- Wu, S.C., Yang, S.M., Haug, E.J.** (1986) Dynamics of Mechanical Systems with Coulomb Friction, Stiction, Impact and Constraint Addition-deletion -II Planar Systems, *Mech. & Mach. Theory*, 21(5), pp.407~416.
- Zayas, V.A., Low, S.S., Mahin, S.A.** (1990) A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, *Earthq. Spectra*, 6(2), pp.317~333.

요 지

이 논문에서는 LNG 탱크를 지진으로부터 격리시키는 면진장치의 일종인 마찰진자시스템(FPS)의 성능변화에 따른 구조물 응답 및 지진취약도를 분석하였다. 마찰진자시스템(FPS)에 사용되는 마찰재 시편을 PVDF와 TiO_2 의 배합비율에 따라 제작하였다. 제작한 마찰재 시편의 물성을 면진받침에 적용하여 구조물의 가속도 응답 및 외조 콘크리트의 하부 모멘트에 대하여 분석하고 각각의 한계상태에 대해 지진취약도를 분석하였다. 구조물의 지진취약도 분석을 통한 최적의 배합비를 가지는 마찰재 선정에 대해 각 한계상태에 따른 지진취약도 곡선의 가중치 설정 후 조합이 필요한 것을 확인하였다. 이를 통하여 다양한 구조물에 적용되는 마찰진자시스템의 요구 성능을 만족하는 최적의 마찰재 선정이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 마찰진자시스템(FPS), 마찰재, LNG 탱크, PVDF, TiO_2 , 지진취약도, 시뮬레이션