

유한요소 신뢰성 해석을 통한 액체저장탱크의 지진 취약도 평가

이상목, 이영주*
울산과학기술원 도시환경공학부

Seismic Fragility Assessment of Liquid Storage Tanks by Finite Element Reliability Analysis

Sangmok Lee, Young-Joo Lee*

School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

요약 액체저장탱크는 화학물질을 다루는 산업단지의 주요한 구조물로서, 지진으로 인한 구조물의 손상은 화학물질의 유출, 화재, 폭발 등의 추가적인 피해를 야기한다. 따라서 액체저장탱크의 지진 취약성을 사전에 효율적으로 평가하고, 지진에 대비하는 일이 필수적이라고 할 수 있다. 지진으로 인해 진동하는 액체저장탱크는 액체-구조물의 상호작용으로 탱크 벽체에 유동압력이 작용하며, 이는 탱크의 응력을 증가시키고 구조적 손상을 일으키는 원인이 될 수 있다. 한편, 구조물의 지진 취약성은 여러 불확실성 요인들을 고려하여 정해진 한계상태에 대한 파괴확률을 산정함으로써 평가하게 되는데, 보다 정확한 액체저장탱크 지진 취약도 평가를 위해서는 신뢰성 해석 과정에서 정교한 유한요소 해석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 최근에 신뢰성 해석 소프트웨어와 유한요소 해석 소프트웨어를 서로 연동시켜 개발된 FERUM-ABAQUS를 활용한 유한요소 신뢰성 해석을 통해 액체저장탱크의 파괴확률을 계산하였다. 이러한 유한요소 신뢰성 해석 기법은 두 소프트웨어 간의 자동적인 데이터 교환이 가능하여 보다 효율적으로 구조물의 지진 취약성을 평가할 수 있으며, 이를 통해 얻은 파괴확률 결과를 바탕으로 지진 강도에 따른 액체저장탱크의 지진 취약도 곡선을 성공적으로 도출하였다.

Abstract A liquid storage tank is one of the most important structures in industrial complexes dealing with chemicals, and its structural damage due to an earthquake may cause a disastrous event such as the leakage of hazardous materials, fire, and explosion. It is thus essential to assess the seismic fragility of liquid storage tanks and prepare for seismic events in advance. When a liquid storage tank is oscillated by a seismic load, the hydrodynamic pressure caused by the liquid-structure interaction increases the stress and causes structural damage to the tank. Meanwhile, the seismic fragility of the structure can be estimated by considering the various sources of uncertainty and calculating the failure probabilities in a given limiting state. To accurately evaluate the seismic fragility of liquid storage tanks, a sophisticated finite element analysis is required during their reliability analysis. Therefore, in this study, FERUM-ABAQUS, a recently-developed computational platform integrated with commercial finite element and reliability analysis software packages, is introduced to perform the finite element reliability analysis and calculate the failure probability of a liquid storage tank subjected to a seismic load. FERUM-ABAQUS allows for automatic data exchange between these two software packages and for the efficient seismic fragility assessment of a structure. Using this computational platform, the seismic fragility curve of a liquid storage tank is successfully obtained.

Keywords : Finite element reliability analysis, Fragility curve, Liquid storage tank, Liquid-structure interaction, Seismic fragility

본 논문은 2013년 UNIST(울산과학기술원) 연구비(1.130045.01)에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Young-Joo Lee(Ulsan National Institute of Science and Technology)

Tel: +82-52-217-2825 email: ylee@unist.ac.kr

Received March 9, 2017

Revised March 31, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

1. 서론

최근 빈번하게 발생하고 있는 지진으로 인해 여러 사회기반시설들에 대한 피해 우려가 증가하고 있다. 특히 산업단지의 경우 각종 화학물질들을 다루기 때문에, 만약 지진 발생으로 인해 단지 내 구조물이 손상을 입을 경우 직접적인 손상 피해 외에도 유해화학물질의 유출, 화재, 폭발 등 추가적인 피해가 야기될 수 있다. 특히 산업단지의 액체저장탱크는 보통 다량의 화학물질을 담고 있기 때문에, 정확한 지진 취약성 평가와 함께 그를 바탕으로 하는 엄격한 관리가 이루어져야 한다.

지진으로 인해 진동하는 저장탱크 내부의 액체 운동은 대류성분(convective component)과 충격성분으로(impulsive component)로 나누어 설명할 수 있다[1]. 상부액체는 대류성분으로 구분되며 저장탱크의 진동주기보다 상대적으로 긴 주기의 슬로싱(sloshing) 현상이 나타난다. 반면 충격성분으로 구분되는 하부액체는 탱크 벽체와 일체 거동하며, 특히 강성(rigid) 탱크보다 연성(flexible) 탱크에서 하부액체 운동에 의한 충격하중이 더 크게 작용한다[2]. 이처럼 지진하중을 받는 액체저장탱크는 액체-구조물의 상호작용으로 인해 탱크 벽체에 유동압력이 발생하고, 이로 인해 탱크 벽체에 추가적인 응력과 손상을 줄 수 있다. 따라서 액체저장탱크의 지진 취약성 평가를 위해서는 액체-구조물의 상호작용을 고려한 정교한 유한요소 해석이 요구된다.

한편 지진 취약성 평가는 구조물과 연관된 각종 불확실성 요인들의 고려를 필요로 하며, 흔히 지진 취약도 곡선으로 표현된다[3]. 지진 취약도 곡선은 구조물이 일정 지진 강도에 대해 일정 수준 이상의 피해를 입을 확률을 계산하여 얻어지며, 크게 경험적 곡선, 판단적 곡선, 해석적 곡선, 하이브리드 곡선으로 분류되는데[4], 본 연구에서는 해석적 방법을 통해 액체저장탱크의 지진 취약도 곡선을 도출하고자 한다. 이는 경험적 데이터와 주관적 판단을 필요로 하지 않으며, 정교한 유한요소 해석 소프트웨어의 발달로 해석 결과의 신뢰도를 높일 수 있다는 장점이 있다. 하지만 기존의 해석적 방법을 통한 액체저장탱크 지진 취약도 평가 방식은 단순한 1차원 구조해석 모델을 통해 이루어지거나[5], 불확실성 요소를 반영하기 위해 많은 수의 유한요소 샘플 모델을 구성하여 액체저장탱크의 지진 취약성을 평가하는 방식이었다[6]. 이러한 접근법들은 액체-구조물의 상호작용 효과를 정확하

게 고려할 수 없거나 해석비용이 크게 늘어나는 한계점을 가진다. 본 연구에서는 액체-구조물의 상호작용을 정확히 반영하기 위해 3차원 유한요소 모델을 구축하였다. 또한 해석비용 절감을 위해 유한요소 해석 소프트웨어와 신뢰성해석 소프트웨어를 연동시킨 유한요소 신뢰성 해석 기법[7, 8]을 도입하여 보다 효율적으로 지진 취약도 평가를 수행하였다.

2. 신뢰성 해석 기법

지진 취약성 평가는 구조물과 관련된 각종 불확실성 요인들을 고려해 이루어져야 하며, 이는 신뢰성 해석을 필요로 한다. 신뢰성 해석 방법은 크게 샘플링 기반에 의한 방법과 해석적 방법으로 나누어질 수 있는데[3], 몬테카를로 시뮬레이션과 같은 샘플링 기반에 의한 해석 방법은 결과의 신뢰성을 높이기 위해 많은 수의 샘플이 필요하지만, FORM(First Order Reliability Method)[9]과 같은 해석적 방법은 상대적으로 적은 해석비용으로도 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FORM을 활용해 액체저장탱크의 파괴확률을 산정하고 지진 취약도 곡선을 도출하였다.

구조신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 한계상태함수를 정의해야 하는데, 이는 구조물과 관련된 여러 불확실성 요인들을 고려하여 구조물의 거동이 어떤 특성 상태에 도달하는 것을 수식으로 표현한 것이다. 구조물이 주어진 한계상태를 넘는 경우를 파괴되었다고 볼 수 있으며, 수식적으로는 $g(\mathbf{x}) \leq 0$ 로 표현되는데, 여기에서 \mathbf{x} 는 불확실성을 갖는 확률변수의 벡터이고 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 로 표현된다. 이 경우 파괴확률 P_f 는 식 1과 같이 계산된다.

$$P_f = P[g(\mathbf{x}) \leq 0] = \int f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1)$$

여기에서 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ 는 \mathbf{x} 에 대한 결합확률밀도함수(joint probability density function, joint PDF)를 나타내며, 이 확률변수들의 공간을 표준 확률변수 공간으로 변환하면 파괴확률 P_f 는 식 2와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$P_f = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_{G(\mathbf{u}) \leq 0} \varphi_n(\mathbf{u}) d\mathbf{u} \quad (2)$$

여기에서 $G(\mathbf{u})=g(\mathbf{T}^{-1}(\mathbf{u}))$ 는 표준 정규공간에서의 한계상

태함수이며, $\phi_n(\cdot)$ 은 n 차 표준정규 결합확률밀도함수, \mathbf{u} 는 n 개의 표준 정규 공간에서의 확률변수 벡터, \mathbf{T} 는 처음에 정의된 확률변수 공간에서 표준 확률변수 공간으로의 일대일 사상변환 매트릭스를 나타낸다.

FORM에서는 파괴확률 P_f 를 구하기 위해서, 한계상태함수 $G(\mathbf{u})$ 를 식 3에 의해 정의되는 점 \mathbf{u}^* 에서의 선형함수로 근사시킨다.

$$\mathbf{u}^* = \arg \min \{ \|\mathbf{u}\| \mid G(\mathbf{u}) = 0 \} \quad (3)$$

여기에서 ‘arg min’은 위의 조건을 만족시키는 최소 인수를 의미하며, $\|\cdot\|$ 은 L^2 -norm을 나타낸다. \mathbf{u}^* 는 $G(\mathbf{u})=0$ 을 만족하는 점들 중에서 표준 정규 공간의 원점과 최소 거리를 갖는 점을 뜻한다. 파괴영역인 $G(\mathbf{u}) \leq 0$ 을 만족하는 점들 중에서 가장 큰 확률을 갖는 점을 의미하기 때문에, 흔히 Most Probable Point(MPP) 또는 Design Point라고 부른다. Fig. 1은 2차원 공간에서의 FORM해석의 개념도를 보여준다.

MPP에서의 선형 함수는 근사적으로 식 4처럼 표현된다.

$$G(\mathbf{u}) \cong \nabla G(\mathbf{u}^*)(\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) = \|\nabla G(\mathbf{u}^*)\| (\beta - \alpha \mathbf{u}) \quad (4)$$

여기서, $\nabla G(\mathbf{u}^*) = [\frac{\partial G}{\partial u_1}, \frac{\partial G}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial G}{\partial u_n}]$ 는 기울기 벡터,

$\alpha = -\frac{\nabla G(\mathbf{u}^*)}{\|\nabla G(\mathbf{u}^*)\|}$ 는 MPP에서의 음의 정규 기울기 벡터를 의미한다. 또한 신뢰성 지수는 $\beta = \alpha \mathbf{u}^*$ 로 정의되며, 파괴확률은 식 5와 같이 근사적으로 계산된다.

$$P_f \cong \Phi(-\beta) \quad (5)$$

여기서, $\Phi(\cdot)$ 은 표준정규분포의 누적분포함수(cumulative

distribution function, CDF)를 의미한다.

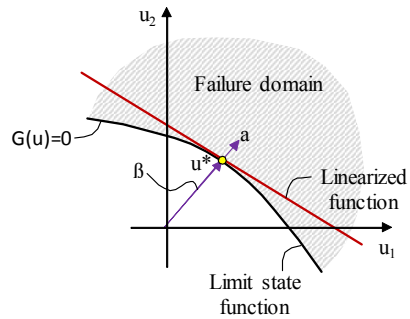


Fig. 1. Linear approximation in FORM[9]

3. 지진 취약도 평가 기법

지진 취약도 곡선은 구조확률론에 근거해 구조물의 안전도를 나타내는 수단으로 다양한 구조물에 대해 널리 활용되고 있는데, 구조물의 성능에 영향을 미치는 불확실성 요소들을 고려하여 구조물이 정해진 수준 이상의 피해를 입을 확률을 지진 강도에 따라 계산하여 얻게 된다[10].

본 연구에서는 액체저장탱크의 동적거동과 액체-구조물 상호작용을 보다 정확하게 고려하면서 효율적인 지진 취약도 분석을 하기 위해 유한요소 신뢰성 해석 플랫폼인 FERUM-ABAQUS[7, 8]를 도입하였다. Fig. 2은 FERUM-ABAQUS 플랫폼의 개요를 보여준다. 이 플랫폼은 신뢰성 해석 소프트웨어인 FERUM(Finite Element Reliability Using Matlab)과 범용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS를 연결시킨 것으로써, 이는 FERUM

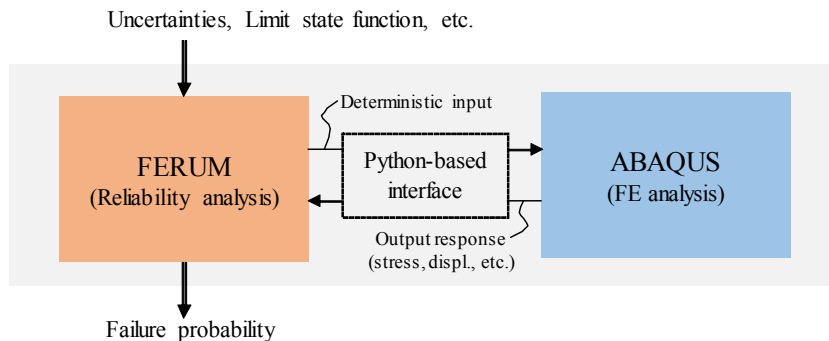


Fig. 2. Outline of finite element reliability analysis (FERUM-ABAQUS)

과 ABAQUS 간의 자동적인 데이터 교환이 가능하도록 해주고, 궁극적으로는 유한요소 모델에 대한 비선형 동적 해석을 반복적으로 수행하면서 그 결과를 바탕으로 FORM 해석을 수행해 구조물의 지진 취약성을 효율적으로 평가할 수 있게 해준다.

FERUM-ABAQUS는 그동안 다양한 구조신뢰성 문제에 적용되었으며[11, 12], 최근 Python 기반의 인터페이스 모듈이 추가되어 보다 효율적인 구조물 취약성 평가가 가능하게 되었다[7, 8].

4. 수치예제

4.1 유한요소 모델

본 예제의 유한요소 모델은 기존 연구들 중에서 사용된 액체저장탱크 모델[13]을 참고하여 제작되었으며, Fig. 3에 나타나 있다. 이 모델은 가솔린 액체가 강제 벽체를 갖는 저장탱크에 담겨 있도록 구성되어 있다. 강제 벽체는 셸 요소(Shell element)인 S4로, 액체는 연속체 요소(Continuum element)인 C3D8로 각각 모델링 되었으며, 액체 요소의 경우 액체 유동을 고려하기 위해 상태 방정식(Equation of state)과 액체의 점성이 정의되었다. Fig. 4는 모델의 치수들을 보여주고 있으며, Table 1에는 강제와 가솔린 액체의 재료적 특성이 요약되어 있다.

아울러 본 연구에서는 지진 취약도 평가를 위해 총 15개의 지진파가 해석과정에서 사용되었는데, 이는 지진파의 형태 및 강도에 존재하는 불확실성을 고려하기 위함이다. 해석에 사용된 지진파들은 최대지반가속도와 최대지반속도의 비(a/v)에 따라 3가지 유형으로 구분되었고, 그 기준은 식 (6)과 같다[14]. 입력지진파에 대한 보다 자세한 사항은 Table 2에 정리되어 있다[3].

$$\begin{aligned}
 \text{Low} &: a/v < 0.8g/ms^{-1} \\
 \text{Intermediate} &: 0.8g/ms^{-1} \leq a/v \leq 1.2g/ms^{-1} \\
 \text{High} &: 1.2g/ms^{-1} < a/v
 \end{aligned}$$

(6)

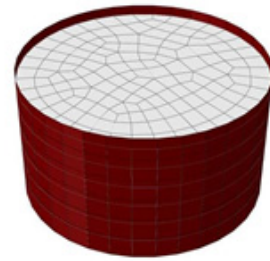


Fig. 3. Liquid storage tank model for ABAQUS

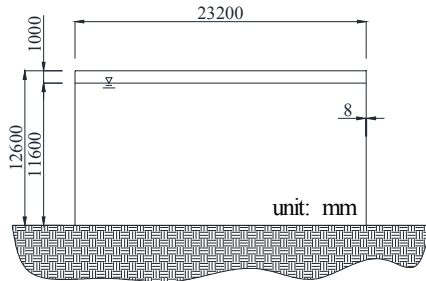


Fig. 4. Dimensions of the model

본격적인 지진 취약도 평가에 앞서, 지진으로 인한 저장탱크의 동적거동이 탱크 벽체에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 임의로 선택된 세 가지 지진파(Set01-03, Set02-03, Set03-03)와 0.4g 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)에 대해 비선형 동적 해석을 수행하였다. von-Mises 응력이 최대로 발생하는 시점에서의 응력 분포를 도출하였다. 이 결과를 지진파가 적용되지 않은, 즉 동적거동이 발생되지 않은 상태의 모델에 대해 정적 해석을 수행하여 도출된 von-Mises 응력 분포와 비교하였다(Figs. 5-7). 그림에서처럼 지진 발생 시 최대응력이 발생하는 지점은 주로 탱크벽체 하부로 나타났으며, 또한 지진으로 인해 탱크 벽체에 발생한 최대응력은 그렇지 않은 경우와 비교했을 때 상당히 증가함을 확인할 수 있다.

Table 1. Material properties of the liquid storage tank model

Material	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Steel	7850	203.395	0.3
Gasoline	680	-	-

Table 2. Detailed information of input ground motions[3]

a/v level	Name	Earthquake event/Location	Magnitude	Date	Soil type	Distance (km)	Max. acceleration (m/s^2)	a/v (g/ms^{-1})
Low	Set01-01	Bucharest/Romania	6.40	3/4/1977	Rock	4	-1.906	0.275
	Set01-02	Erzincan/Turkey	Unknown	3/13/1992	Stiff soil	13	-3.816	0.382
	Set01-03	Aftershock of Montenegro/Yugoslavia	6.20	5/24/1979	Alluvium	8	-1.173	0.634
	Set01-04	Kalamata/Greece	5.50	9/13/1986	Stiff soil	9	-2.109	0.657
	Set01-05	Kocaeli/Turkey	Unknown	8/17/1999	Unknown	101	-3.039	0.750
Intermediate	Set02-01	Aftershock of Friuli/Italy	6.10	9/15/1976	Soft soil	12	-0.811	1.040
	Set02-02	Athens/Greece	Unknown	9/7/1999	Unknown	24	-1.088	1.090
	Set02-03	Umbro-Marchigiano/Italy	5.80	9/26/1997	Stiff soil	27	-0.992	1.108
	Set02-04	Lazio Abruzzo/Italy	5.70	5/7/1984	Rock	31	-0.628	1.136
	Set02-05	Basso Tirreno/Italy	5.60	4/15/1978	Soft soil	18	0.719	1.183
High	Set03-01	Gulf of Corinth/Greece	4.70	11/4/1993	Stiff soil	10	-0.673	1.432
	Set03-02	Aftershock of Montenegro/Yugoslavia	6.20	5/24/1979	Rock	32	-0.667	1.526
	Set03-03	Aftershock of Montenegro/Yugoslavia	6.20	5/24/1979	Alluvium	16	-1.709	1.564
	Set03-04	Aftershock of Umbro-Marchigiana/Italy	5.00	11/9/1997	Rock	2	0.412	1.902
	Set03-05	Friuli/Italy	6.30	5/6/1976	Rock	27	3.500	1.730

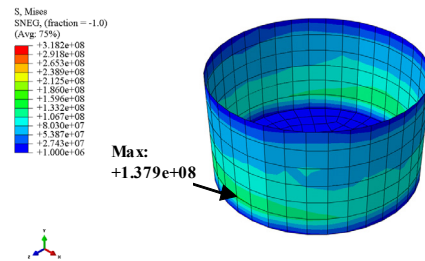
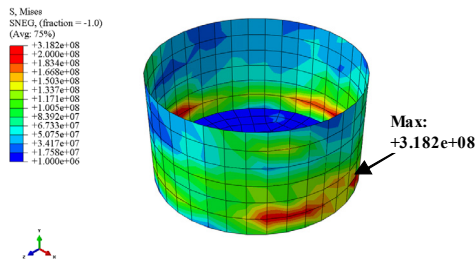


Fig. 5. Von Mises stress distributions

(a) Nonlinear dynamic analysis (Set01-03, 0.4g PGA) with oscillating liquid

(b) Static analysis with non-oscillating liquid

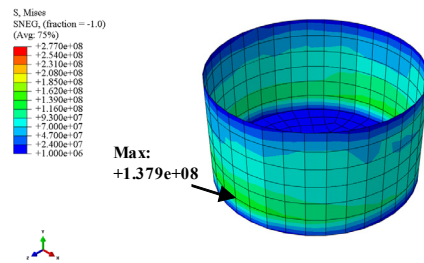
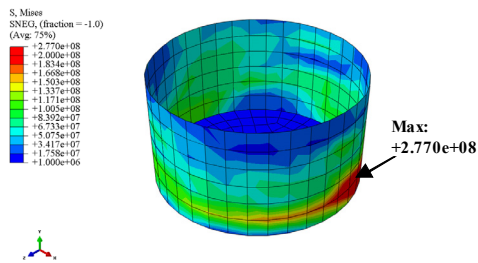


Fig. 6. Von Mises stress distributions

(a) Nonlinear dynamic analysis (Set02-03, 0.4g PGA) with oscillating liquid

(b) Static analysis with non-oscillating liquid

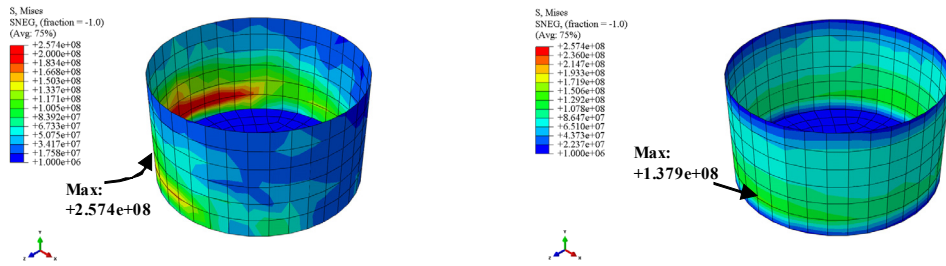


Fig. 7. Von Mises stress distributions

(a) Nonlinear dynamic analysis (Set03-03, 0.4g PGA) with oscillating liquid

(b) Static analysis with non-oscillating liquid

4.2 확률변수 및 한계상태

본격적인 지진 취약도 평가를 위해 본 예제에서는 지진파, 강재의 탄성계수 및 항복강도를 불확실성 요소로 가정하였다. 지진파의 경우 Table 2에서 분류된 것처럼 a/v 의 수준에 따라 다수의 지진파를 사용하는 것을 통해 불확실성을 고려하였으며, 강재 탄성계수 및 항복강도는 확률변수로써 불확실성을 고려하였다. 확률변수에 대한 통계적 특성은 Probabilistic Model Code[15]를 참고하였으며, Table 3에 요약되어 있다.

서론에서 전술한 바와 같이 지진하중을 받는 액체저장탱크는 액체-구조물의 상호작용으로 인해 탱크 벽체에 유동압력이 작용하여 구조물의 손상이 야기될 수 있다. 따라서 구조물의 한계상태를 탱크 벽체에 작용하는 응력이 강재의 항복강도에 도달하는 경우로 결정하여 파괴확률을 산정하였다.

4.3 지진 취약도 곡선

FERUM-ABAQUS를 사용한 FORM 해석을 통해 주어진 한계상태에 대한 구조물의 파괴확률을 계산하고, 그 결과를 바탕으로 PGA에 따른 지진 취약도 곡선을 도출하였다.

우선 Fig. 8은 세 가지 a/v 수준에 대한 취약도 곡선을 나타낸다. 그림에서 a/v 수준에 따라 구조물의 파괴확률이 달라짐을 확인할 수 있으며, 낮은 수준의 a/v 를 갖는 지진파에서 구조물이 손상을 입을 확률이 상대적으로 높았다. 낮은 a/v 에 속하는 지진파일수록 상대적으로 긴 주기의 진동 특성을 갖고 있기 때문에, 저장탱크 벽체에 손상에 영향을 주는 유동압력 또한 긴 시간동안 지속적으로 발생하게 된다. 이로 인해 낮은 a/v 의 지진파가 가해졌을 경우 상대적으로 큰 응력이 저장탱크 벽체에 발생할 가능성을 내포하고 있으며, Figs. 5-7의 동적해석 결과에서도 확인할 수 있다. 따라서 지진파의 특성이 구조물의 취약성에 영향을 줄 수 있기 때문에, 특정 지역에서의 지진 취약도 평가 시 해당 지역에서 발생할 확률이 가장 높은 지진파의 특성에 대한 조사가 필히 선행되어야 한다. 반면, 해당 지역에 대한 지진파의 유형을 판단하기 힘든 경우에는 세 가지 종류의 지진파가 동일한 발생 가능성을 갖는다는 가정 하에 각 해석 결과를 모두 평균하여 지진 취약도 곡선을 도출할 수 있다. 이렇게 해서 얻은 액체저장탱크에 대한 취약도 곡선은 Fig. 9와 같다.

Table 3. Material properties of the liquid storage tank model

Random variable	Distribution type	Mean (MPa)	Coefficient of variation
Young's modulus	Normal	203.395×10^3	0.03
Yield strength	Normal	248.210	0.07

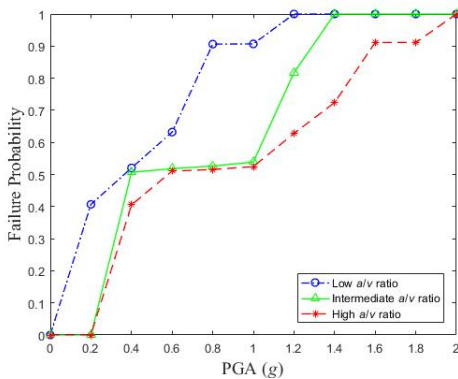


Fig. 8. Seismic fragility curves for different a/v ratios

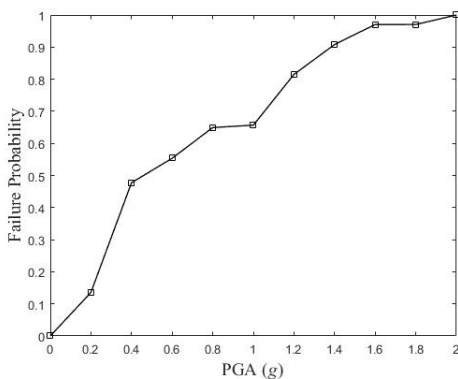


Fig. 9. The averaged seismic fragility curve

5. 결론

지진하중을 받는 액체저장탱크는 액체-구조물 상호작용으로 발생하는 유동압력으로 인해 탱크 벽체에 상대적으로 큰 응력과 손상이 발생한다. 그렇기 때문에 보다 정확한 지진 취약도 평가를 위해서는 이러한 점을 고려할 수 있는 정교한 유한요소 모델과 그를 활용한 신뢰성 해석이 요구된다.

이에 본 연구에서는 액체저장탱크에 대한 보다 효율적이면서도 정확한 지진 취약도 평가를 위해 유한요소 신뢰성 해석 플랫폼인 FERUM-ABAQUS를 도입하였다. 액체-구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 정교한 유한요소 모델을 신뢰성 해석에 적용하였고, 이를 통해 지진파의 특성에 따른 액체저장탱크의 파괴확률을 산정하여 성공적으로 지진 취약도 곡선을 도출하였다. 결과에 서처럼 지진파의 특성에 따라 파괴확률이 차이를 보였으

며, 특히 장주기 진동 특성을 갖는 낮은 a/v의 지진파에서 상대적으로 높은 파괴확률을 보였다. 이처럼 지진파의 유형이 구조물의 지진 취약도 평가에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에, 관심 지역에서 발생할 확률이 가장 높은 지진파의 특성에 대한 고려가 필수적임을 확인할 수 있었다.

References

- [1] G.W. Housner, "The dynamic behavior of water tanks." *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 53, no. 2, pp. 381-387, 1963
- [2] A.S. Veletsos, "Seismic effects in flexible liquid storage tanks." *Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering*, vol. 1, 1974.
- [3] D.-S. Moon, Y.-J. Lee, and Sangmok Lee, "Seismic vulnerability assessment of RC frame structures using 3D analytical models", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 9, pp. 724-731, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.724>
- [4] O.S. Kwon and A.S. Elnashai, "The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure", *Engineering Structures*, vol. 28, no. 2, pp. 289-303, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.07.010>
- [5] I. Iervolino, G. Fabbrocino and G. Manfredi, "Seismic vulnerability of standardised industrial components: application to oil storage tanks", *In Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004.
- [6] M. S. Razzaghi and S. Eshghi, "Probabilistic Seismic Safety Evaluation of Precode Cylindrical Oil Tanks", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 29, no. 6, 2014.
- [7] J. Lee, Y.-J. Lee, H. Kim, S.-H. Sim and J.-M. Kim, "A new methodology development for flood fragility curve derivation considering structural deterioration for bridges." *Smart Structures and Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 149-165, 2016. DOI: <https://doi.org/10.12989/sss.2016.17.1.149>
- [8] H. Kim and S.-H. Sim, "Flood fragility analysis of bridge piers in consideration of debris impacts", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 5, pp. 325-331, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.325>
- [9] A. Der Kiureghian. *Fisrt- and second-order reliability methods*. chap.14, CRC press, Boca Raton, FL, USA, 2005.
- [10] S. Jeong and A.S. Elnashai, "Probabilistic fragility analysis parameterized by fundamental response quantities", *Engineering Structures*, vol. 29, pp. 1238-1251, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.06.026>
- [11] Y.J. Lee, J. Song and E.J. Tuegel, "Finite element

system reliability analysis of a wing torque box." *Proc. 10th ALAA Nondeterministic Approaches Conference*, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2008-1718>

- [12] W.-H. Kang, Y.-J. Lee, J. Song and B. Gencturk, "Further development of matrix-based system reliability method and applications to structural systems." *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 441-457, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.539060>
- [13] A. Di Carluccio, G. Fabbrocino and G. Manfredi, "FEM seismic analysis of steel tanks for oil storage in industrial facilities." *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
- [14] T.J. Zhu, A.C. Heidebrecht and W.K. Tso, "Effect of peak ground acceleration to velocity ratio on ductility demand of inelastic systems." *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 16, no. 1, pp. 63-79, 1988.
DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160106>
- [15] JCSS. *Probabilistic Model Code*, The Joint Committee on Structural Safety, 2001, Available From: <http://www.jcss.byg.dtu.dk/>. (accessed Oct., 2016)

이 영 주(Young-Joo Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 서울대학교 지구환경 시스템공학부 (토목공학석사)
- 2012년 5월 : Univ. of Illinois, Urbana-Champaign (토목공학박사)
- 2012년 6월 ~ 2013년 5월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 연구조교수
- 2013년 6월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 조교수

<관심분야>

구조공학, 신뢰성공학, 내진 해석 및 설계

이 상 목(Sangmok Lee)

[정회원]



- 2012년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (토목공학학사)
- 2014년 2월 : 한양대학교 건설환경공학과 (구조공학석사)
- 2014년 2월 ~ 2014년 12월 : (주)에담엔지니어링 토목사업부 사원
- 2015년 1월 ~ 2015년 7월 : 코스피(주) 구조설계팀 사원

- 2015년 9월 ~ 2016년 2월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 석사후연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 박사과정

<관심분야>

구조공학, 신뢰성공학