

유한요소 해석을 활용한 매설 배관의 지진 취약도 곡선 도출 기법 비교

Comparative Study on Seismic Fragility Curve Derivation Methods of Buried Pipeline Using Finite Element Analysis

이승준¹⁾ · 윤성식²⁾ · 송현성¹⁾ · 이진미³⁾ · 이영주^{4)*}

Lee, Seungjun¹⁾ · Yoon, Sungsik²⁾ · Song, Hyeonsung¹⁾ · Lee, Jinmi³⁾ · Lee, Young-Joo^{4)*}

¹⁾울산과학기술원 도시환경공학과 석박사통합과정, ²⁾한남대학교 시융합학과 조교수, ³⁾국립재난안전연구원 연구원, ⁴⁾울산과학기술원 도시환경공학과 부교수

¹⁾Graduate Student, Department of Urban and Environment Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, ²⁾Assistant Professor, Department of Artificial Intelligence, Hannam University, ³⁾Researcher, Earthquake Hazards Reduction Center, National Disaster Management Research Institute, ⁴⁾Associate Professor, Department of Urban and Environment Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

/ A B S T R A C T /

Seismic fragility curves play a crucial role in assessing potential seismic losses and predicting structural damage caused by earthquakes. This study compares non-sampling-based methods of seismic fragility curve derivation, particularly the probabilistic seismic demand model (PSDM) and finite element reliability analysis (FERA), both of which require employing sophisticated finite element analysis to evaluate and predict structural damage caused by earthquakes. In this study, a three-dimensional finite element model of API 5L X65, a buried gas pipeline widely used in Korea, is constructed to derive seismic fragility curves. Its seismic vulnerability is assessed using nonlinear time-history analysis. PSDM and a FERA are employed to derive seismic fragility curves for comparison purposes, and the results are verified through a comparison with those from the Monte Carlo Simulation (MCS). It is observed that the fragility curves obtained from PSDM are relatively conservative, which is attributed to the assumption introduced to consider the uncertainty factors. In addition, this study provides a comprehensive comparison of seismic fragility curve derivation methods based on sophisticated finite element analysis, which may contribute to developing more accurate and efficient seismic fragility analysis.

Key words: Seismic fragility curve, Finite element analysis, Probabilistic seismic demand model, Finite element reliability analysis, Comparative study

1. 서론

지진은 구조물에 막대한 피해를 주어 인명 손실, 재산 피해, 장기적인 경제 및 사회적 영향을 초래할 수 있는 자연현상으로, 현재의 과학기술로는 충분한 사전 발생 예측이 불가능에 가깝다. 따라서, 연구자들은 지진이 발생한 이후의 피해 정도를 예측하고 이를 저감하기 위해서는 어떤 제도와 시스템을 갖추어야 하는지에 많은 연구 역량을 집중하고 있다. 제도와 시스템의 적합성을 평가하기 위해서는 정확한 지진 피해 예측이 동반되어야 하며, 이러한 지진 피해 평가 수단으로서 지진 취약도 곡선은 지진으로 인한 구조물

의 손실을 예측하고 지진 피해 완화와 관련된 의사결정에 핵심적인 역할을 한다[1]. 예를 들어, HAZUS-MH[2] 및 SYNER-G[3]와 같은 지진 위험 평가 시스템은 지진 취약도 곡선을 활용하여 다양한 지진 시나리오에 대한 구조적 피해 뿐만 아니라, 사회·경제적 손실 및 인명피해 등을 평가할 수 있도록 해준다. 따라서, 여러 연구자들이 다양한 구조물에 대한 지진 취약도 곡선을 정확하고 효율적으로 도출하고자 시도하였다[4].

일반적으로 지진 취약도 곡선은 구조 응답에 영향을 미치는 다양한 불확실성을 고려하여 주어진 지반 운동 강도에 대해 구조물이 미리 정의된 손상 수준 이상의 피해를 입을 확률을 계산하여 얻어진다. 지진 취약도 곡선은 도출되는 방식에 따라서 경험적 곡선, 판단적 곡선, 해석적 곡선, 하이브리드 곡선으로 분류되며, 이 중 해석적 기법은 실증적 데이터와 주관적 판단이 필요하지 않다는 장점이 있다[5]. 또한, 정교한 유한요소 해석(finite element analysis)을 바탕으로 객관적이고 신뢰도 높은 취약도 곡선 도출이 가능하

*Corresponding author: Lee, Young-Joo

E-mail: ylee@unist.ac.kr

(Received July 17, 2023; Revised August 6, 2023; Accepted August 7, 2023)

다. 그러나 이러한 해석적 기법을 이용하여 취약도 곡선을 도출하기 위해서는 반복적인 유한요소 해석이 요구된다. 특히, 몬테카를로 시뮬레이션 (Monte Carlo sampling, MCS)과 같은 샘플링 기반의 기법은 여러 확률 변수를 고려하는 샘플들을 발생시킨 후, 각각의 샘플에 대해 반복적인 구조 해석을 수행하여 얻은 결과를 바탕으로 확률을 계산하는 방법으로, 기법의 적용이 직관적이지만 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서 충분한 수의 샘플과 그에 따른 구조해석이 요구된다. 또한, 낮은 수준의 파괴 확률을 계산하기 위해서는 요구되는 샘플의 수가 기하급수적으로 증가하며, 그만큼 계산 비용이 증가하는 단점이 있다[6]. 따라서, 정교한 유한요소 해석을 활용하면서도 샘플링을 필요로 하지 않는 해석적 취약도 곡선 도출 기법들에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다[7, 8].

흔히 사용되는 대표적인 비샘플링 기반(non-sampling-based) 해석적 지진취약도 도출 방법으로는 확률론적 지진 응답 모델(probabilistic seismic demand model, PSDM) 기법이 있다. 지반 운동 강도와 구조물 응답의 관계를 로그 선형모델로 근사하는 PSDM[9] 기법은 비선형 시간이력 해석(nonlinear time-history analysis)과 같은 정교한 유한요소 해석을 바탕으로 주어진 지반 운동 강도에 대한 구조물의 응답을 확률적으로 평가하여 지진 취약도 곡선 도출에 활용할 수 있도록 해준다. 그러나 PSDM을 기반으로 도출된 취약도 곡선은 앞서 언급된 지반 운동 강도와 구조물 응답 사이의 로그 선형 가정 이외에도, 구조물의 수용력(capacity)과 응답(demand)이 로그 정규분포를 따른다는 확률론적 측면의 가정을 도입한다. 한편, 최근 유한요소 해석 소프트웨어와 신뢰성 해석 소프트웨어를 연계하여 이러한 근사 가정들을 도입하지 않으면서도 샘플링 기반 기법에 비해 효율적으로 취약도 곡선을 도출할 수 있는 유한요소 신뢰성 해석(finite element reliability analysis, FERA) 플랫폼과 기법들이 개발되었다[6, 10]. 개발된 FERA 기법들은 대표적인 비샘플링 기반의 신뢰성 해석 기법인 FORM(first-order reliability method)[11]을 활용하여 상대적으로 적은 해석 비용으로도 지반 운동에 대한 불확실성과 구조물과 관련된 다양한 불확실성 요인들을 개별적으로 고려하면서 신뢰할 만한 취약도 곡선 도출이 가능하다는 장점이 있다.

그간 여러 연구에서 각 기법을 활용해 지진취약도 곡선이 도출된 바 있으나, 이에 관한 비교 연구는 찾아보기 어렵다. 이에 본 연구에서는 정교한 유한요소 해석을 활용한 지진 취약도 곡선 도출 기법에 대한 비교를 수행하고자 한다. 대상 구조물로 국내에서 널리 사용되고 있는 매설가스 배관인 API 5L X65를 선택해 3차원 유한요소 모델을 구축하고, 비선형 시간이력 해석 결과를 바탕으로 지진 취약도 곡선을 도출하였다. 지진 취약도 곡선은 구조해석과 확률론적 근사가정이 적용된 PSDM과 이러한 근사가정이 없는 FERA[9]를 활용하여 각각 도출되었으며, 이에 따른 계산비용을 나타내었다. 또한, MCS 결과와 비교해 기법의 정확도에 대한 분석을 수행하였다.

2. 확률론적 지진 응답 모델(PSDM)

지진 취약도 곡선에서 손상 확률(P_f)은 일반적으로 식(1)과 같이 주어진 지반 운동 강도(IM)에서의 구조물 응답(D)이 손상 기준에 따른 수용력(C)을 초과하는 확률로 정의된다[12].

$$P_f = P[D > C | IM] \quad (1)$$

여기서, 지반 운동 강도를 표현하는 지수로는 여러 가지가 있으며, 일반적으로 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA), 최대지반속도(peak ground velocity, PGV), 최대지반변위(peak ground displacement, PGD), 스펙트럼 가속도(spectral acceleration, Sa), 스펙트럼 변위(spectral displacement, Sd) 등이 흔히 사용된다.

PSDM을 활용해 지진 취약도 곡선을 도출하기 위해서는 먼저 지반 운동 강도에 대한 지수를 결정하고, 다양한 지반 운동 강도 값에 대해서 비선형 시간이력 해석을 수행한다. 그리고 그 결과를 지반 운동 강도와 구조물 응답과의 로그선형 관계식으로 나타내게 된다. 이를 위해서, 지반 운동 강도와 대상 구조물의 지진 응답이 식(2)와 같은 지수 모델의 근사식으로 표현된다고 가정한다[9].

$$D = a \cdot IM^b \quad (2)$$

여기에서 a 와 b 는 회귀 분석을 통해 결정되는 미지 매개변수이며, 식(2)의 양변에 자연로그를 취하면 아래 식(3)과 같은 로그 선형식을 얻을 수 있다.

$$\ln(D) = \ln(a) + b \cdot \ln(IM) \quad (3)$$

이는 PSDM의 주요 가정 중 하나인 구조해석 측면에서의 로그 선형 가정을 의미하며, 다양한 지반 운동 강도값에 대한 비선형 시간이력 해석 결과를 토대로 회귀 분석을 수행해 식(3)의 매개변수 a 와 b 가 결정된다.

한편, 구조물의 수용력과 응답이 로그 정규분포를 따른다는 확률론적인 근사 가정에 의해, 식(1)의 손상 확률 계산식은 다음 식(4)와 같이 표현될 수 있다.

$$P_f = P[D > C | IM] = \Phi \left(\frac{\ln(S_D) - \ln(S_C)}{\sqrt{(\beta_{D|IM})^2 + (\beta_C)^2}} \right) \quad (4)$$

이렇게 식이 표현될 수 있는 이유는 로그 정규분포를 따르는 것으로 가정된 D 와 C 에 대해 자연로그를 취하면 $\ln(D)$ 와 $\ln(C)$ 는 정규분포를 따르게 되기 때문이며, 식(4)에서 S_D 는 주어진 지반 운동 강도값에 대한 구조물 응답의 로그 정규분포 중앙값, S_C 는 구조물 수용력의 로그 정규분포 중앙값, $\Phi(\cdot)$ 는 표준 정규분포의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF), $\beta_{D|IM}$ 는 주어진 지반 운동 강도값에 대한 구조물 응답의 로그 표준편차, β_C 는 구조물 수용력의 로그 표준편차를 나타낸다. 그리고 $\beta_{D|IM}$ 는 다음 식(5)에 의해서 계산된다[13].

$$\beta_{D|IM} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [\ln(d_i) - \ln(S_D)]^2} \quad (5)$$

여기서, d_i 는 i 번째 지반 운동 강도값에 대해 비선형 시간이력 해석으로 얻은 구조물 응답이며, N 은 고려하고 있는 총 지반 운동 횟수이다. Fig. 1은 주어진 지반 운동 강도값과 비선형 시간이력 해석 결과(회색점)를 바탕으로 얻어지는 PSDM 선형 회귀 관계식의 예를 나타내며, $N(\bullet)$ 은 괄호 안의 수들을 평균과 표준편차로 하는 정규분포를 의미한다.

한편, Ramamoorthy et al.[14]은 지반 운동 강도값이 커지면서 나타나

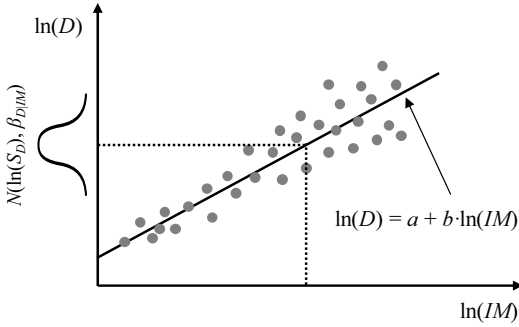


Fig. 1. Example of PSDM

계 되는 구조물 응답의 비선형성 고려하기 위해서 이선형(bilinear) PSDM을 활용하여 구조물의 취약성 평가를 수행하였다. 이에 본 연구에서는 선형과 이선형 PSDM을 모두 활용해서 대상 구조물의 지진 취약도 곡선을 도출하고, 각 취약도 곡선의 정확성을 비교하였다.

3. 유한요소 신뢰성 해석(FERA)

FORM은 표준 정규공간으로 변환된 한계상태 함수(limit-state function)의 선형 근사를 사용하여 사건의 확률을 계산하며, 한계상태 함수 $g(\mathbf{x})$ 는 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(\mathbf{x}) = C(\mathbf{x}) - D(\mathbf{x}) \tag{6}$$

여기서, \mathbf{x} 는 $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 로 표현되며, n 개의 확률변수들(random variables)로 이루어진 벡터를 의미한다. 또한, $g(\mathbf{x}) < 0$ 는 파괴 영역(failure domain)으로 정의되며, 주어진 한계상태 함수에 의해 정의된 구조물의 파괴 사건을 의미하게 된다. 한계상태 함수를 활용해서 식 (1)의 손상 확률은 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = P[g(\mathbf{x}) < 0 \mid IM] = \int_{g(\mathbf{x}) < 0 \mid IM} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \tag{7}$$

여기서, $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ 는 확률변수 벡터 \mathbf{x} 의 결합확률밀도 함수(joint probability

density function, joint PDF)를 의미하며, 지반 운동 강도에 따라 한계 상태 함수 내 구조물 응답이 달라지기 때문에 ' $g(\mathbf{x}) < 0 \mid IM$ '과 같이 표현된다. 그리고 확률 변수들은 Nataf[15] 변환과 같은 적절한 변환기법을 통해 표준 정규공간으로 변환되며, 식 (7)은 다음 식 (8)과 같이 표현된다.

$$P_f = \int_{g(\mathbf{x}) < 0 \mid IM} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_{G(\mathbf{u}) < 0 \mid IM} \phi_n(\mathbf{u}) d\mathbf{u} \tag{8}$$

여기서 $G(\mathbf{u})$ 는 본래의 한계상태 함수 $g(\mathbf{x})$ 를 표준 정규공간으로 변환한 것으로 $G(\mathbf{u}) = g(T^{-1}(\mathbf{u}))$ 의 관계를 가진다. 그리고 $\phi_n(\cdot)$ 는 n 개의 표준정규 변수에 대한 joint PDF를, T 는 $\mathbf{u} = T(\mathbf{x})$ 를 만족하는 일대일 사상변환 함수를 의미한다.

FORM을 이용해 손상 확률을 계산하기 위해서, 표준 정규공간에서의 한계상태 함수 $G(\mathbf{u})$ 를 1차 테일러 급수(first-order Taylor series)로 선형 근사하여 식 (9)와 같은 기하학적 최적화 문제를 풀게 된다.

$$\mathbf{u}^* = \text{arg min} \{ \|\mathbf{u}\| \mid G(\mathbf{u}) = 0 \} \tag{9}$$

여기서, 'arg min'은 주어진 함수의 최소화를, $\|\cdot\|$ 는 L^2 -norm을 의미한다. 또한, \mathbf{u}^* 는 design point 또는 most probable point(MPP)라 불리는 데, $G(\mathbf{u}) = 0$ 을 만족하는 여러 \mathbf{u} 중에서 원점으로부터 거리가 최소인 \mathbf{u} 를 의미하게 된다. 이때, 원점과 MPP 사이의 거리를 신뢰도 지수(reliability index) β 로 나타내며, 손상 확률은 식 (10)와 같이 근사적으로 구해진다.

$$P_f \cong \Phi(-\beta) \tag{10}$$

FORM에 대한 보다 자세한 설명은 Der Kiureghian[11]에서 찾아 볼 수 있다.

한편, 정확하고 효율적인 구조신뢰성 해석을 위해 FERA에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 일환으로 유한요소 해석 소프트웨어와 신뢰성 해석 소프트웨어 간의 연결 플랫폼들이 개발되고 있다. 지금까지 여러 FERA 플랫폼이 개발되었으며, 다양한 구조물 안정성 및 취약성 평가에 활용되었다. Lee et al.[8]은 항공기 구조물의 구성 요소 및 시스템 신뢰성 해석을 위해 FERUM-ABAQUS를 개발했으며, Lee and Moon[6]은 3차원

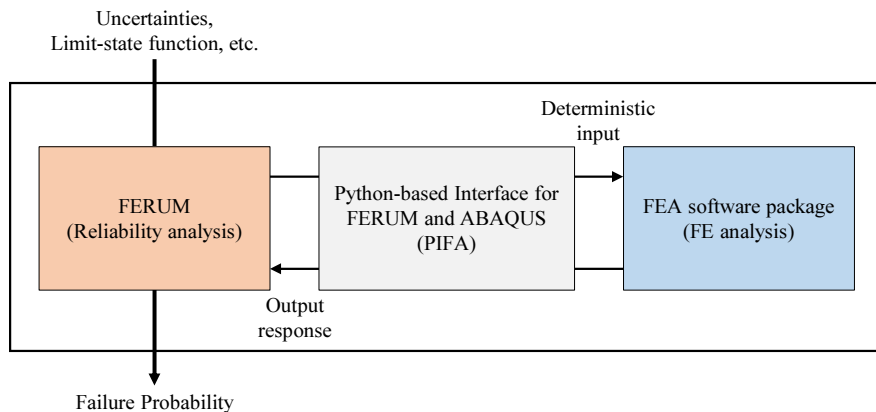


Fig. 2. Overview of introduced FERA platform, PIFA

철근콘크리트 구조물의 지진 취약성 평가를 위해 FERUM-ZEUS를 제안하였고, Lee et al.[10]은 홍수 취약도 곡선 도출을 위해 FERUM-ABAQUS를 위한 Python 기반의 인터페이스를 개발하였다.

이러한 FERA 플랫폼은 구조적 복잡성이 높고 비선형성이 강한 구조물의 안정성 문제를 다루는 데 있어서 강점을 최대한 활용하기 위해, 서로 다른 전문성을 갖춘 각각의 소프트웨어를 연결해 하나의 소프트웨어처럼 동작하도록 한다. 본 연구에서는 효율적인 지진 취약도 곡선을 도출하기 위해 PIFA (Python-based interface for FERUM and ABAQUS)[10]를 도입하였으며, FERUM 과 ABAQUS 소프트웨어 사이를 연결하는 PIFA 인터페이스의 개요는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 PIFA는 세 개의 구성 요소로 이루어지는데, 이는 (1) 신뢰성 해석을 위한 FERUM(Finite Element Reliability Using MATLAB), (2) 유한요소 해석을 위한 ABAQUS, (3) 두 소프트웨어 패키지를 연결하는 모듈이다. FERUM[16]은 UC Berkeley 연구팀이 개발한 오픈 소스 신뢰성 해석 소프트웨어로서 FORM을 포함하여 다양한 신뢰성 해석 기법을 지원한다. ABAQUS는 널리 사용되는 상용 유한요소 해석 소프트웨어이며, 플랫폼에서 PIFA는 FERUM 및 ABAQUS와 상호 작용하여 FERA를 효율적으로 수행할 수 있다. ABAQUS는 FERUM으로부터 불확실성 정보를 고려하여 유한요소 모델을 구성하고 구조해석을 수행하며, FERUM에서는 ABAQUS에서 계산된 응력, 변형 및 변위 등의 구조적 응답을 입력값으로 받아서 FORM 해석을 수행하게 된다.

4. 수치 예제

4.1 유한요소 모델

본 연구에서는 유한요소 해석을 활용한 지진 취약도 곡선 도출 기법 비교를 위해서, 국내에서 널리 사용되는 매설 가스 배관인 API 5L X65에 대

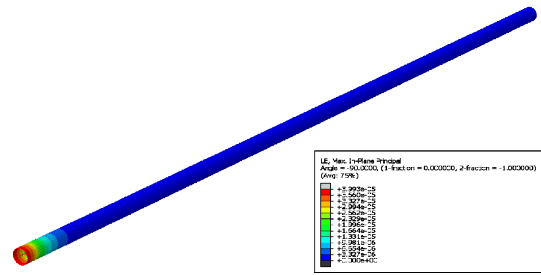


Fig. 3. Nonlinear time-history analysis result of strain distribution for buried gas pipeline

해 3차원 유한요소 모델을 구축하고 비선형 시간이력 해석을 수행해 지진 취약도 곡선을 도출하였다. 매설 가스 배관의 유한요소 모델은 Yoon et al.[17]에서 제안된 매설 배관 유한요소 모델을 사용하였으며, 배관의 재료 물성치는 Table 1에 나타내었다. 매설 배관의 외경은 762 mm, 내경은 727 mm의 중공 단면을 가지는 원형강이며, 마찰 계수는 0.8로 가정되었다. 또한, 강재의 비선형성을 고려하기 위해 가스 배관인 API 5L X65에 흔히 쓰이는 Ramberg-Osgood model[18]을 적용하였다. 배관의 총 길이는 1.2 km, 매설 깊이는 1.881 m로 고려하였고, 매설 배관의 양단은 3축 방향의 변위와 회전이 모두 구속되어 있으며, 배관 중간은 3축 방향의 회전에 대해서만 구속조건을 적용하였다. 매설 가스 배관의 수치 모델링 구축에 관한 보다 상세한 내용은 Yoon et al.[17]에서 확인할 수 있다.

Yoon et al.[17]은 매설 배관과 지반의 상호작용을 고려하기 위해서 비선형 Winkler Foundation 모델[19]을 도입하였으며, 이를 상용 유한요소 해석 소프트웨어 ABAQUS를 활용하여 효과적으로 모델링하였다. ABAQUS에서 제공하는 3차원 배관-지반 상호작용 요소(PSI34)는 매설된 가스 배관과 주변 지반의 비선형 거동을 나타낼 수 있으며, 유한요소 이산화(discretization)없이 지반의 강성을 정의하는 구성 모델(constitutive model)로 표

Table 1. Material properties of API 5L X65 gas pipeline

Mass density (kg/m ³)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Outer diameter (mm)	Thickness (mm)	Coefficient of friction
7,850	210.7	0.3	445	563.8	762	17.5	0.8

Table 2. Detailed information of selected input ground motions

Name	Earthquake	Year	PGA (g)	Magnitude (ML)	*Predominant period (s)	Mechanism	Station
EQ01	Gulf of Aqaba	1995	0.109	7.20	0.44 / 0.14 / 0.18	Strike slip	Eliat
EQ02	Borrego	1968	0.130	6.63	0.26 / 0.20 / 0.24	Strike slip	El centro array #9
EQ03	Cape Mendocino	1992	0.178	7.01	0.32 / 1.68 / 0.52	Reverse	Eureka-Myrtle & West
EQ04	Chi-Chi	1999	0.263	7.62	0.52 / 0.52 / 0.54	Reverse oblique	CHY014
EQ05	Chi-Chi	1999	0.198	7.62	0.14 / 0.14 / 0.14	Reverse oblique	ILA067
EQ06	Coalinga-01	1983	0.194	6.36	0.64 / 1.46 / 0.46	Reverse	Parkfield Fault Zone 1
EQ07	Imperial Valley	1979	0.351	6.35	0.48 / 0.06 / 0.12	Strike slip	Delta
EQ08	Kocaeli	1999	0.187	7.51	0.54 / 0.04 / 0.38	Strike slip	Fatih
EQ09	Landers	1992	0.109	7.28	0.44 / 0.96 / 0.50	Strike slip	Indio-Coachella Canal
EQ10	Loma Prieta	1989	0.159	6.93	0.16 / 0.18 / 0.22	Reverse oblique	Hayward-BART
EQ11	San Fernando	1971	0.107	6.61	0.18 / 0.28 / 0.22	Reverse	Whittier Narrows Dam
EQ12	Tabas	1978	0.108	7.35	0.32 / 0.14 / 0.24	Reverse	Ferdows

* Directions: Axial direction / Vertical direction / Transverse horizontal direction

Table 3. Statistical properties of random variables

Random variable	Distribution type	Mean	Coefficient of variance
Yield strength (MPa)	Log-Normal	465.5	0.07
Elastic modulus (GPa)	Normal	210.7	0.05

현하였다. 또한, 1,000개의 배관 요소(PIPE31)를 활용하여 1.2 km의 매설된 배관 및 지반 영역을 정의하였으며, 구조물의 감쇠비는 레일레이 감쇠계수(Rayleigh damping coefficient)를 사용하여 임계 감쇠에 대해 5%로 가정하였다. Fig. 3는 매설된 가스 배관의 ABAQUS 모델을 나타내며, 임의의 지반 운동에 대해 비선형 시간이력 해석을 수행하고, 변형률이 최대로 발생하는 시점에서의 변형률 분포를 도출하였다. 최대 변형률은 고정단 근처에서 나타났으며, 변형률 분포는 고정단으로부터의 거리가 줄어들어 따라 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 활용한 매설 배관의 유한요소 모델 및 동적 특성에 대한 자세한 내용은 Yoon et al.[17]에서 또한 확인할 수 있다.

유한요소 해석을 활용하여 지진 취약도 곡선을 도출하기 위해서는 지진의 세기, 지속시간, 주파수 특성 등 지반 운동에 대한 다양한 불확실성 요소들을 고려하는 것이 필수적이며, 충분한 수의 입력 지진에 대해 비선형 시간이력 해석을 수행하여 구조물의 응답을 도출해야 한다. 본 연구에서는 축방향, 횡방향, 수직방향을 모두 고려하는 12개의 지진파를 선정하였으며, PGA를 지반 운동 강도를 나타내는 지수, 즉 *IM*으로 활용하였다. 선정된 지진파의 PGA를 0.05 g 부터 1.00 g 까지 0.05 g 간격으로 증가시키며 비선형 시간이력 해석을 수행하였다. 입력 지진파에 대한 보다 자세한 사항은 Table 2와 Yoon et al.[17]에서 확인할 수 있다.

4.2 확률변수 및 한계상태

지반 운동에 대한 불확실성 외에도 지진 취약성 평가를 위해 본 연구에서는 강재의 항복강도(yield strength)와 탄성계수(elastic modulus)를 확률변수로 고려하였다. 고려된 확률변수들은 서로 독립으로 가정하였으며, 통계적 특성은 기존의 여러 문헌에서의 정보[20, 21]을 참고하였다. Table 3에는 확률변수들의 통계적 특성이 요약되어 있다.

본 연구에서는 매설 배관의 지진 취약성 평가를 위해서 Shinozuka et al.[22]이 제안한 변형률 기반의 3단계 손상상태를 구조물의 한계상태로 도입하였다. 손상상태는 Minor, Moderate, Major 3가지로 정의되며, Table 4에 정리되어 있다. 여기서, ϵ_p 는 지진하중이 가해졌을 때 나타난 매설 배관의 최대 변형률을 의미하며, ϵ_y 는 매설 배관의 항복 변형률을 나타낸다.

Table 4. Damage states and corresponding structural responses

Damage states	Structural response (limit-state)
Minor damage (Minor leakage)	$\epsilon_p < 0.7\epsilon_y$
Moderate damage (Partial leakage)	$0.7\epsilon_y \leq \epsilon_p < \epsilon_y$
Major damage (Complete break)	$\epsilon_y \leq \epsilon_p$

4.3 지진 취약도 곡선 도출

4.3.1 확률론적 지진 응답 모델(PSDM) 해석 결과

본 연구에서는 12개의 지반 운동에 대해서 다양한 지진 강도로 비선형 시간이력 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 바탕으로 식 (3)을 활용해서 선형과 이선형 PSDM을 도출하였다. Fig. 4은 로그 스케일(logarithmic scale)로 매설 배관의 PSDM을 나타내었으며, PGA가 증가하면서 구조물 응답의 비선형성과 구조물 응답의 표준편차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이선형 PSDM은 매설 배관 구조물 응답의 비선형성을 고려하기 위해서 0.35 g에서 이선형을 고려하였고, 회귀 분석을 통해 얻어지는 식 (3)의 PSDM 계수 *a*, *b*는 Table 5와 같이 도출되었다.

Fig. 5는 선형과 이선형 PSDM을 활용해서 도출된 취약도 곡선을 나타낸다. 취약도 곡선은 Table 4에 제시된 손상상태를 고려하여 Moderate와 Major 손상상태에 대해서 각각 도출되었다.

크기가 커지면서 나타나는 구조물 응답의 비선형성과 불확실성이 이선형 PSDM의 경우 0.35 g를 기점으로 취약도 곡선의 불연속구간이 나타나게 된다. 이는 PGA 크기가 커지면서 나타나는 구조물 응답의 비선형성과 불확실성이 이선형 PSDM에 반영되기 때문이다. 또한, 선형 PSDM에 의

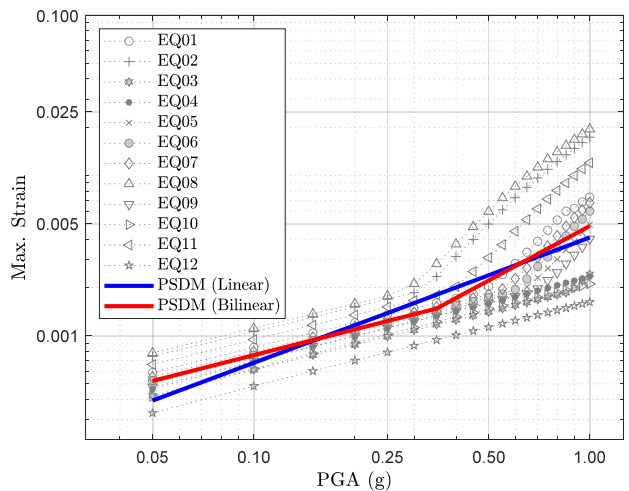


Fig. 4. Linear and bilinear PSDMs of buried gas pipeline

Table 5. Coefficients of PSDMs

PSDM	<i>a</i>	<i>b</i>
Linear	0.0041	0.7826
Bilinear	0.0026 (PGA ≤ 0.35)	0.5344 (PGA ≤ 0.35)
	0.0048 (PGA > 0.35)	1.1311 (PGA > 0.35)

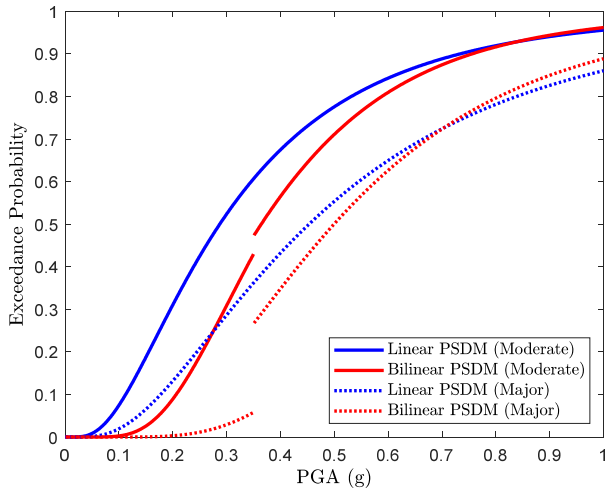


Fig. 5. Seismic fragility curves derived by PSDMs

해 도출된 지진 취약도 곡선의 경우 이선형 PSDM에 비해 전반적으로 보수적인 취약도 곡선이 도출되는 것을 확인하였다.

4.3.2 유한요소 신뢰성 해석(FERA) 결과

FERA 플랫폼 PIFA로 PSDM과 동일하게 12개의 지반운동에 대해서 다양한 지진 강도로 비선형 시간이력 해석을 수행하여 지진 취약도 곡선을 도출하였다. Fig. 6는 Moderate와 Major 손상상태에 대한 지진 취약도 곡선을 나타내었다. 도출된 취약도 곡선은 12개 지반 운동에 대해서 도출된 취약도 곡선을 산술 평균하여 얻어진다.

FERA를 활용하여 얻어진 지진 취약도 곡선은 PSDM에 비해 구조해석 측면 및 확률론적 근사가정이 적용되지 않기 때문에 더 정확한 결과를 도출할 수 있다. 그러나, 이를 위해 모든 입력 지진에 대한 취약도 곡선을 개별적으로 도출해야하므로, PSDM에 비해 상대적으로 계산비용이 증가할 수 있다. 본 예제의 경우 PSDM은 각 입력 지진파에 대해 20번의 구조해석이 필요하여, Moderate과 Major 손상상태에 대해 각각 240번의 구조해석이 요

구된다. 반면에, FERA의 경우 Moderate과 Major 손상상태에 대해 각각 3027, 4896번의 구조해석이 소요되었다. 이를 통해, FERA의 계산비용이 PSDM에 비해 상대적으로 높음을 확인할 수 있다.

4.3.3 지진 취약도 곡선 비교

본 연구에서는 PSDM과 유한요소 신뢰성 해석을 활용해서 도출된 취약도 곡선을 비교하고, 5% 변동성의 MCS로 추정된 초과 확률을 정해로 고려하여 일부 손상수준 및 지반운동 강도에 대해 각각의 취약도 곡선 도출 기법들의 정확성을 정량적으로 평가하였다. 이 때 MCS를 위한 샘플 수는 해석 결과인 확률값이 5% 이내의 변동성을 갖기에 충분한 수[6]로 결정하였다.

Table 6은 0.25 g, 0.50 g, 0.75 g에 대해서 Moderate 손상상태에 대한 초과 확률을 선형, 이선형 PSDM, FERA 및 MCS로 평가한 결과를 나타낸다. 개별 PGA에 대해 FERA를 사용하여 도출한 초과 확률이 MCS를 기반으로 평가한 결과와 가장 유사하였으며, 이선형 PSDM, 선형 PSDM 순으로 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 Moderate와 Major 손상상태에 대해서 선형, 이선형 PSDM 및 FERA으로 도출된 지진 취약도 곡선을 나타내었다. 또한, Moderate 손상 상태 및 0.25 g, 0.5 g, 0.75 g에 대한 제한적인 MCS 결과도 확인할 수 있는데, 이는 비샘플링 기반 기법인 PSDM과 FERA에 비해 샘플링 기반인 MCS를 모든 손상수준과 PGA에 대해 적용하기 어렵기 때문이나, 다루어진 모든 경우에서 MCS와 FERA의 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 아울러, 전반적으로 동일한 PGA에 대해서 선형 PSDM이 주어진 손상상태에 대해 가장 보수적인 결과를 나타내고 있으며, 이선형 PSDM, FERA로 갈수록 낮아지는 경향성을 확인할 수 있다. 이는 PSDM이 FERA와 비교해서 구조해석 측면 및 확률론적 근사가정에 의해 전체적인 불확실성 요인들을 개별 고려하지 않고, 일괄적으로 단순 통합해 고려하는 과정에서 다소 보수적인 초과 확률을 계산하는 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 국내 지진발생 환경에서 일반적인 구조물이 겪게 될 PGA 0.3 g 또는 0.35 g 이하에서는 이선형 PSDM의 결과가 FERA 및 MCS 해석 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 하지만 보다 일반적인 결론을 얻기 위해서는 다양한 구조물에 대한 해석 및 비교가 이루어져야

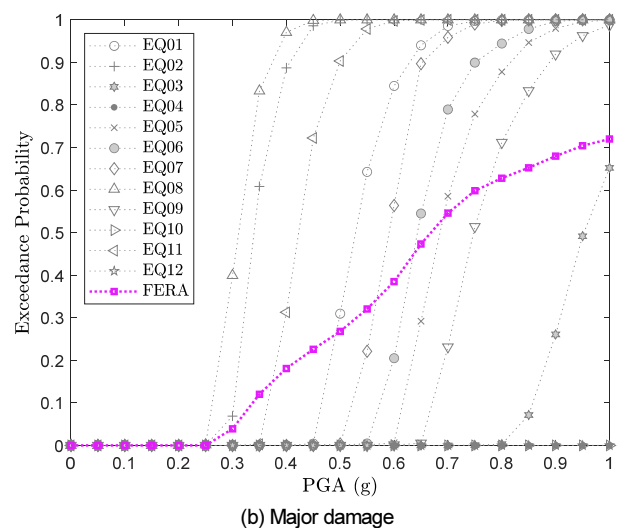
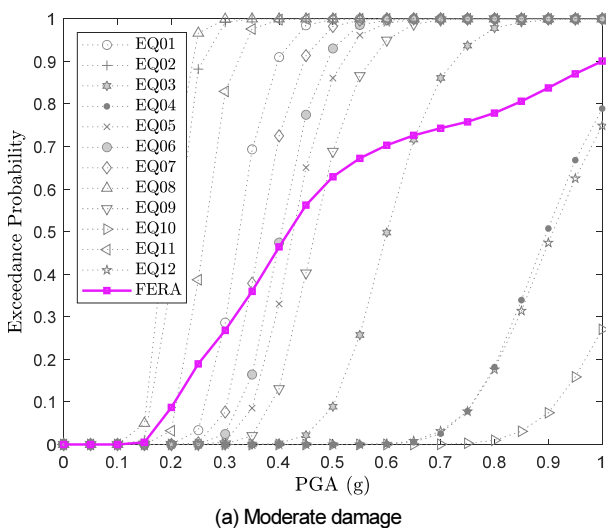


Fig. 6. Seismic fragility curves derived by FERA

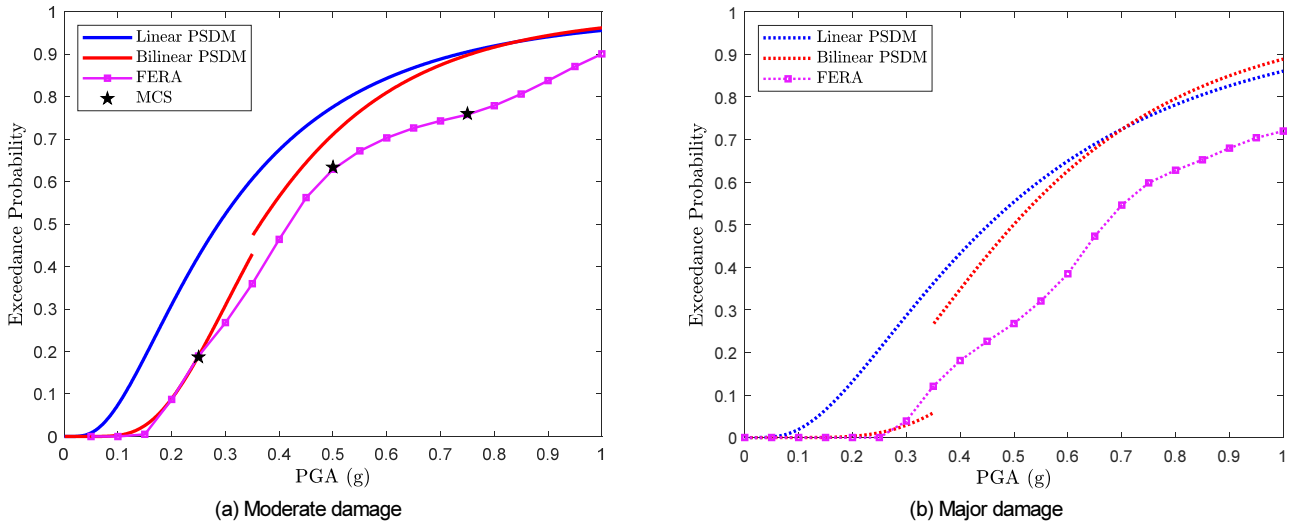


Fig. 7. Seismic fragility curves derived by PSDMs, FERA, and MCS

Table 6. Comparison of analysis results of PSDMs, FERA and MCS

PGA	Linear PSDM	Bilinear PSDM	FERA	MCS
0.25 g	0.425	0.189	0.189	0.187
0.50 g	0.776	0.711	0.629	0.634
0.75 g	0.905	0.898	0.758	0.760

하며, 이를 통해 보다 효율적이면서도 신뢰할 수 있는 지진 취약도 곡선 기법이 도출될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 정교한 유한요소 해석을 활용한 비샘플링 기반의 지진 취약도 곡선 도출 기법 간의 정확성과 계산비용을 비교하였다. 이를 위해 국내에서 널리 사용되고 있는 매설 가스 배관인 API 5L X65에 대하여 3차원 유한요소모델을 구축하고 비선형 시간이력 해석을 활용하여 지진 취약성 평가를 수행하였다. 본 연구에서 지진 취약도 곡선은 지반 운동 강도와 구조물 응답의 관계를 로그 선형모델로 근사하는 PSDM과 FERA 플랫폼인 PIFA로 각각 도출되었으며, MCS를 기반으로 계산한 손상 확률을 정해로 하여 지진취약도 곡선 도출 기법의 정확성을 정량적으로 평가하였다.

도출된 취약도 곡선의 정확성은 FERA가 가장 높은 것으로 나타났으며, 이선형 PSDM, 선형 PSDM 순서로 나타났다. 이는 취약성 평가 기법이 불확실성을 얼마나 세밀하게 나눠 고려하는 것인가에 따라 도출되는 취약도 곡선이 달라진다고 생각할 수 있다. 즉, PSDM의 경우에는 고려하고 있는 불확실성 요인들을 단순통합해 고려하는 과정에서 보수적인 평가가 이루어져 취약성 평가의 정확성이 다소 떨어진 것으로 보인다. 그러나 이선형 PSDM은 FERA와 MCS에 비해 계산비용의 이점이 있으면서도 구조물이 실질적으로 겪을 수 있는 PGA 0.3 g 또는 0.35 g 이하에서는 도출된 지진 취약도 곡선이 FERA에서 도출된 것과 거의 동일한 것을 볼 수 있었다. 하지만 보다 일반적인 결론을 얻기 위해서는 다양한 구조물에 대한 해석 및 비교가 이루어져야 하며, 이를 통해 보다 효율적이면서도 신뢰할 수 있는 지진 취약도 곡선 기법이 도출될 수 있을 것으로 기대된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA163162).

/ REFERENCES /

1. Yoon SS, Lee YJ, Jung HJ . A comprehensive framework for seismic risk assessment of urban water transmission networks, *Int J Disast Risk Re.* 2018 Oct;31:983–994.
2. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Hazus®-MH 2.1, Technical manual.* Available from: <http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus>
3. Pitilakis K, Franchin P, Khazai B, Wenzel H. *SYNER-G: systemic seismic vulnerability and risk assessment of complex urban, utility, lifeline systems and critical facilities: methodology and applications.* Springer; c2014
4. Zentner I, Gündel M, Bonfils N. *Fragility analysis methods: Review of existing approaches and application.* *Nucl Eng Des.* 2017 Nov; 323:245–258.
5. Kwon OS. *Probabilistic seismic assessment of structure, foundation, and soil interacting systems.* Ph.D. Dissertation, University of Illinois, Urbana, IL, USA; c2007
6. Lee YJ, Moon DS. A new methodology of the development of seismic fragility curves. *Smart Struct Syst.* 2014 Nov;14(5):847–867.
7. Lee SM, Kim BM, Lee YJ. Seismic fragility analysis of steel liquid storage tanks using earthquake ground motions recorded in Korea. *Math Probl Eng.* 2019 Jul;6190159.
8. Lee YJ, Song JH, Tuegel EJ. Finite element system reliability analysis of a wing torque box. *Proc. 10th AIAA Nondeterministic Approaches Conference,* April 7–10, Schaumburg, IL., USA; c2008
9. Cornell CA, Jalayer J, Hamburger RO, Foutch DA. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel

- moment frame guidelines, *J Struct Eng*, 2002 Apr;128(4):526–533.
10. Lee JB, Lee YJ, Kim HJ, Sim SH, Kim JM. A new methodology development for flood fragility curve derivation considering structural deterioration for bridges. *Smart Struct Syst*. 2016 Jan;17(1):149–165.
 11. Der Kiureghian A. *Firsrt- and second-order reliability methods*. Boca Raton, FL, USA, CRC press; c2005. Chapter 14.
 12. Padgett JE, DesRoches R. Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridges. *Earthq Eng Struct D*. 2008 Apr;37(8):1157–1174.
 13. Mangalathu S, Choi ES, Park HC, Jeon JS. Probabilistic seismic vulnerability assessment of tall horizontally curved concrete bridges in California. *J Perform Constr Fac*. 2018 Dec;32(6):04018080.
 14. Ramamoorthy SK, Gardoni P, Bracci JM. Probabilistic demand models and fragility curves for reinforced concrete frames. *J Struct Eng*. 2006 Oct;132(10):1563–1572.
 15. Liu PL, Der Kiureghian A. Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances. *Probabilist Eng Mech*. 1986 Jun;1(2):105–112.
 16. Haukaas T. *Finite element reliability and sensitivity methods for performance-based engineering*. Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, CA, USA; c2003.
 17. Yoon SS, Lee DH, Jung HJ. Seismic fragility analysis of a buried pipeline structure considering uncertainty of soil parameters. *Int J Pres Ves Pip*. 2019 Aug;175:103932.
 18. Abdella K. Inversion of a full-range stress-strain relation for stainless steel alloys. *Int J Nonlin Mech*. 2006 Apr;41(3):456–463.
 19. ASCE. *Guidelines for the design of buried steel pipe*. American Lifelines Alliance, 2001.
 20. Keshtegar B, Miri M. Reliability analysis of corroded pipes using conjugate HL-RF algorithm based on average shear stress yield criterion. *Eng Fail Anal*. 2014 Nov;46:104–117.
 21. Zarrin M, Asgarian B, Abyani M. Probabilistic seismic collapse analysis of jacket offshore platforms. *J Offshore Mech Arct*. 2018 Jun;140(3).
 22. Shinozuka M, Takada S, Ishikawa H. Some aspects of seismic risk analysis of underground lifeline systems. 1979 Feb;101(1):31–43.