

## 3차원 해석 모델을 이용한 RC 프레임 구조물의 지진 취약도 평가

문도수, 이영주\*, 이상목  
울산과학기술원 도시환경공학부

### Seismic Vulnerability Assessment of RC Frame Structures Using 3D Analytical Models

Do-Soo Moon, Young-Joo Lee\*, Sangmok Lee

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

**요약** 지진으로 인한 구조물의 피해가 지속적으로 증가하면서, 구조물의 취약성을 평가하는 일은 지진 대비에 필수적으로 여겨지고 있다. 지진 취약도 곡선은 지진에 대한 구조물의 안전도에 대한 확률 지표로써 널리 이용되고 있으며, 많은 연구자들에 의해 보다 정확하고 효율적인 취약도 곡선 도출을 위한 노력이 계속되고 있다. 하지만 기존의 대부분의 연구에서는 취약도 곡선 도출시 수치해석 시간 절약을 위해 단순화된 2차원 해석모델을 사용해 왔는데, 많은 경우에 있어 2차원 모델은 정확한 구조물의 내진 거동 및 지진 취약성을 평가하기에 적당하지 않을 수 있다. 이에 본 연구에서는 3차원 해석 모델을 사용하여 더욱 정확하면서도 여전히 효과적으로 지진 취약도 곡선을 도출할 수 있는 방법을 제시한다. 이 방법은 신뢰성 해석 소프트웨어인 FERUM과 구조해석 소프트웨어인 ZEUS-NL을 서로 연동시켜 상호 자동적인 데이터 교환이 가능하게 하고, 샘플링 기법이 아닌 FORM 해석 기법을 통해 구조물의 파괴확률을 구한다. 이는 3차원 모델을 사용의 경우에도 효율적으로 구조 신뢰성 해석이 가능하게 해준다. 이를 이용해 RC 프레임 구조물의 3차원 해석 모델을 사용하여 지진 취약성 평가를 수행하였다.

**Abstract** As the structural damage caused by earthquakes has been gradually increasing, estimating the seismic fragility of structures has become essential for earthquake preparation. Seismic fragility curves are widely used as a probabilistic indicator of structural safety against earthquakes, and many researchers have made efforts to develop them in a more accurate and effective manner. However, most of the previous research studies used simplified 2D analytical models when deriving fragility curves, mainly to reduce the numerical simulation time; however, in many cases 2D models are inadequate to accurately evaluate the seismic behavior of a structure and its seismic vulnerability. Thus, this study provides a way to derive more accurate, but still effective, seismic fragility curves by using 3D analytical models. In this method, the reliability analysis software, FERUM, is integrated with the structural analysis software, ZEUS-NL, enabling the automatic exchange of data between these two software packages, and the first order reliability method (FORM), which is not a sampling-based method, is utilized to calculate the structural failure probabilities. These tools make it possible to conduct structural reliability analyses effectively even with 3D models. By using the proposed method, this study conducted a seismic vulnerability assessment of RC frame structures with their 3D analytical models.

**Keywords** : 3D frame structure, Fragility curve, Nonlinear dynamic analysis, Seismic vulnerability, Structural reliability analysis

본 논문은 2016년 UNIST(울산과학기술원) 연구비(1.160005.01)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 August 18, 2016

Revised September 6, 2016

Accepted September 9, 2016

Published September 30, 2016

## 1. 서론

전 세계적으로 지진이 빈번하게 발생하고 있으며, 지진에 의한 각종 건물과 사회기반시설들의 피해도 지속적으로 증가하고 있다[1]. 이에 발생 가능한 지진에 대한 구조물의 취약성을 사전에 평가하여, 예측되는 구조물의 피해를 저감시키려는 노력들이 계속되어 왔다. 이러한 노력들에 있어 구조물의 상대적인 내진성능을 확률적으로 보여주는 지진 취약도 곡선은 다양한 구조물의 지진 취약도 평가를 수행하는데 매우 유용하게 활용되고 있다. 지진 취약도 곡선은 구조물의 성능에 영향을 미치는 여러 가지 불확실성 요소를 고려하여 다양한 지진 강도에 대하여 구조물이 정해진 수준 이상의 피해를 입을 확률을 계산하여 얻어진다[2]. 이를 위한 구조신뢰성 해석은 그 특성상 반복적인 구조해석을 필요로 하게 되는데, 구조해석에 비교적 오랜 시간이 소요되는 3차원 구조물의 경우 수치해석 시간을 줄이기 위해 2차원으로 단순화된 모델을 사용하여 지진 취약도 곡선을 구하고 있다. 하지만 최근 들어 구조물의 형태는 점점 더 복잡하고 다양해지고 있다. 이러한 경우에는 단순화된 2차원 모델로 정확한 구조물의 거동을 평가할 수 없게 되기 때문에, 3차원 구조해석 모델을 사용하면서도 효율적으로 지진 취약도 평가를 할 수 있는 방법이 요구된다.

기존의 많은 연구들은 3차원 구조물의 지진 취약성 평가를 위해 단순화된 2차원 구조해석 모델을 구축한 후, 이를 활용한 확률론적 시뮬레이션을 통해 지진 취약도 곡선을 도출해 왔다[2, 3]. 하지만 이러한 방법에는 다음과 같은 문제점이 존재할 수 있다. 우선 시뮬레이션 비용 절감을 위해 단순화된 2차원 구조해석 모델으로는, 구조물의 형태가 정형이 아니거나 면외방향 지진하중의 효과까지 고려한 해석을 해야 하는 경우들을 포함한 다

양한 경우의 구조물에 대해서, 정확한 지진 취약성 평가가 어렵다. 다음으로는 몬테카를로 시뮬레이션과 같은 샘플링 기반의 기법들은 신뢰할만한 결과를 얻기 위해서 굉장히 많은 수의 샘플과 그에 따른 구조해석을 요구하기 때문에, 낮은 수준의 파괴 확률들에 대해서는 상당한 수의 샘플로도 결과의 신뢰도가 떨어지게 된다[3].

이에 본 연구에서는 3차원 구조해석 모델을 이용함으로써 보다 정교하게 구조물의 내진거동을 평가할 수 있으면서, 상대적으로 낮은 수준의 파괴 확률을 가지는 구조물에 대해서도 매우 정확한 지진 취약도 곡선을 효율적으로 얻을 수 있는 기법을 도입하였다. 기존 연구들에서는 주로 2차원 구조해석 모델을 바탕으로 한 샘플링 기반 기법이 사용된 반면, 이 기법에서는 구조해석으로 3차원 해석 모델을 이용한 비선형 시간 이력 해석(nonlinear response history analysis)을 수행하면서, 이를 바탕으로 샘플링을 활용하지 않는 대표적인 확률기반 신뢰성 해석 기법인 FORM(First Order Reliability Method)[4]

해석을 활용한다. 이를 위하여 신뢰성 해석 소프트웨어인 FERUM(Finite Element Reliability Using Matlab)[5]과 비선형 동적해석에 특화된 구조해석 소프트웨어인 ZEUS-NL[6]이 사용되었다. 그리고 이들 소프트웨어들을 연동시켜 줄 수 있는 인터페이스인 FERUM-ZEUS이 개발되었다. 이들을 이용한 구조신뢰성 해석 플랫폼의 개요는 Fig. 1과 같다. FERUM-ZEUS를 통한 두 소프트웨어 사이의 자동적인 데이터 교환은 지진 취약도 곡선을 더욱 효율적으로 구할 수 있게 해준다[3]. 이를 이용해 본 연구에서는 RC 프레임 구조물의 지진 취약도 곡선을 3차원 해석 모델을 이용하여 도출하였다.

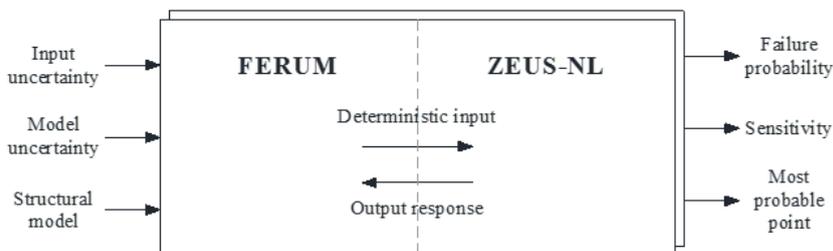


Fig. 1. Outline of structural reliability analysis using FERUM-ZEUS

## 2. 신뢰성 해석 기법

신뢰성 해석 기법들은 크게 두 종류로 나누어질 수 있는데, 몬테카를로 시뮬레이션과 같은 샘플링 기반의 기법과 FORM과 같은 해석적 기법이 그것이다[4]. 샘플링 기반의 해석 방법은 신뢰할 만한 결과를 얻기 위해서 많은 샘플을 필요로 하며, 낮은 파괴 확률에 대해서는 해석 결과의 신뢰도가 떨어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해석의 효율성과 결과의 신뢰성을 높이기 위해 해석적 방법인 FORM을 사용하였다.

구조물에 대해 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 보통 한계상태함수를 정의하게 되는데, 이는 구조물의 거동이 어떤 특성 상태에 도달하는 것을 수식으로 표현한 것이며 흔히  $g(\mathbf{x})$ 로 표시한다. 이 때 구조물이 정해진 한계상태를 넘는 경우를 파괴되었다고 규정할 수 있으며, 수식적으로는  $g(\mathbf{x}) \leq 0$ 로 표현된다. 여기서  $\mathbf{x}$ 는 불확실성을 갖는 확률변수  $n$ 개의 집합이며,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  같이 벡터로 표현된다. 그리고 이 경우 파괴확률  $P_f$ 는 식 1에 의해 계산된다.

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

여기서,  $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ 는  $\mathbf{x}$ 에 대한 결합 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 나타낸다. 이 확률변수 공간을 표준 확률변수 공간으로 변환하면 파괴확률  $P_f$ 는 식 2와 같이 다시 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $G(\mathbf{u}) = g(\mathbf{T}^{-1}(\mathbf{u}))$ 는 표준 정규공간에서의 한계상태함수이며,  $\varphi_n(\cdot)$ 은  $n$ 차 표준정규 확률밀도함수를 나타낸다.  $\mathbf{u}$ 는  $n$ 개의 표준 정규 확률변수를 나타내는 열벡터이고,  $\mathbf{T}$ 는 확률변수 공간에서 표준 확률변수 공간으로의 일대일 사상변환 매트릭스를 의미한다.

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

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

여기서, 'arg min'은 위의 조건을 만족시키는 최소 인수를 의미하며,  $\| \cdot \|$ 은  $L^2$ -norm을 나타낸다.  $\mathbf{u}^*$ 는  $G(\mathbf{u}) = 0$ 을 만족하는 점으로서 표준 정규 공간의 원점에서 최소 거리를 갖는다. Fig. 2는 2차원 공간에서의 FORM해석의 개념도이다.  $\mathbf{u}^*$ 는 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.

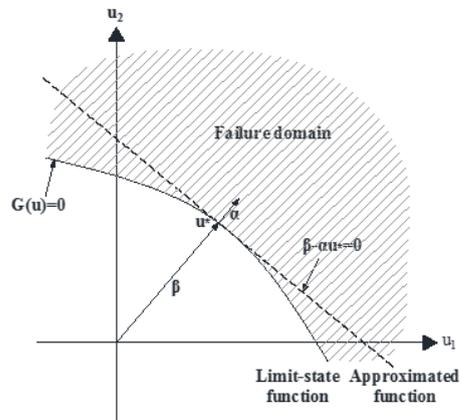


Fig. 2. Linear approximation in FORM[4]

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. 그리고 신뢰성 지수는  $\beta = \alpha \mathbf{u}^*$ 로 정의된다. 따라서 파괴확률은 식 5와 같이 근사적으로 계산된다.

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

여기서,  $\Phi(\cdot)$ 은 표준 정규분포의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)를 의미한다. 보다 자세한 FORM에 대한 설명은 Der Kiureghian[4]에서 찾아볼 수 있다.

### 3. 지진 취약도 평가

#### 3.1 구조신뢰성 해석

정확하면서도 효율적인 구조신뢰성 해석을 위해 신뢰성 및 구조해석 소프트웨어 연결을 통한 구조신뢰성 연구가 활발히 진행되고 있다[5]. 이전 연구를 보면, Der Kiureghian과 Taylor[7]가 처음으로 신뢰성 및 구조해석 알고리즘의 연결을 시도하였으며, 이후 다양한 구조신뢰성 해석 소프트웨어가 개발되어 왔다. 이러한 소프트웨어들은 신뢰성 및 구조해석 모듈의 연결 방식에 따라 두 가지 유형으로 나눌 수 있다. 첫 번째 유형은 CalREL[8], FERUM[5]과 같이 신뢰성 해석 소프트웨어에 자체 구조해석 모듈이 내재되어 있어 별도의 구조 해석 소프트웨어가 필요하지 않는 경우다. 하지만 이들 소프트웨어 대부분은 비교적 간단한 형태의 구조해석만 가능하다는 한계점을 가지고 있다. 또 다른 유형은 NESSUS[9], FERUM-ABAQUS[10-12]와 같이 각각의 구조해석 전용 소프트웨어와 신뢰성 해석 소프트웨어를 사용할 수 있도록 이들 간의 연결 인터페이스를 제공해주는 경우다. 이는 각 소프트웨어들의 장점을 극대화하면서 복잡하고 다양한 구조신뢰성 문제를 해석할 수 있도록 해준다.

본 연구에서는 대표적인 신뢰성 해석 소프트웨어인 FERUM, 구조물의 내진해석에 특화된 ZEUS-NL, 그리고 이 두 소프트웨어를 연결해주는 인터페이스인 FERUM-ZEUS을 활용해 3차원 구조물의 지진 취약도 곡선을 도출하였다. FERUM은 UC Berkeley 연구팀에서 개발된 신뢰성 해석 소프트웨어로서 FORM을 포함하여 다양한 신뢰성 해석이 가능하다. ZEUS-NL은 Mid-America Earthquake (MAE) Center에서 개발된 하이브리드 요소 기반(fiber-element-based) 비선형 구조 해석 소프트웨어로, 기하비선형은 물론 재료비탄형을 고려할 수 있으며 특히 부재단면내에서의 비탄성 영역이 확산되는 현상을 고려할 수 있다[6].

신뢰성 해석과 구조 해석 소프트웨어들 간의 양방향 소통을 위해 개발된 FERUM-ZEUS 인터페이스의 대표적인 기능은 Fig. 1에 나타나 있다. ZEUS-NL은 FERUM으로부터의 불확실성 정보를 고려하여 구조해석을 수행하고, FERUM에서는 ZEUS-NL에서 해석된 결과(힘, 변위 등)값을 입력받아 구조물의 한계상태함수 값을 계산하게 된다. 두 소프트웨어의 자동적인 데이터

교환은 구조신뢰성 해석 효율성을 증대시킨다.

#### 3.2 지진 취약도 평가

본 연구에서는 FERUM-ZEUS를 이용해 3차원 RC 프레임 구조물의 지진 취약도 곡선을 도출하였다. 이전 연구에서 Kwon과 Elnashai[13]는 재료 특성과 지반운동에 대한 불확실성을 고려하여 2차원 RC 구조물에 대한 지진 취약도 평가를 수행한 바 있다. 이를 참고하여 본 연구에서는 3차원 모델을 구성하고, 이를 이용하여 해당 구조물의 지진 취약도 평가를 수행하였다.

##### 3.2.1 해석 모델 및 입력 지진파

본 논문의 대상 구조물은 3층 3경간의 RC 프레임 구조물로서, Fig. 3에서 구조해석을 위해 구축된 ZEUS-NL 모델을, Fig. 4에서 2차원 정면도를 보여주고 있다. 총 48개의 기둥 부재와 72개의 보 부재로 구성되어 있으며, 기둥과 보 부재는 각각 6개와 7개의 요소로 모델링 되었다. 집중질량은 각 절점에 위치하는 것으로 가정하였다.

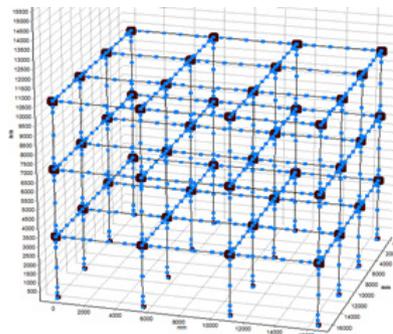


Fig. 3. 3D structural model for ZEUS-NL

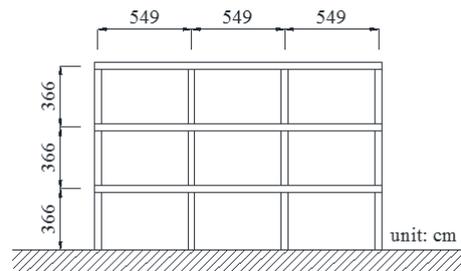


Fig. 4. Elevation view of the building example

입력지진파로는 총 3가지 종류의 총 15개 지진파가 사용되었는데, 이는 지진 취약도 평가 시 지진파의 불확실성을 고려하기 위함이다. 이 3가지 지진파 종류는 최대지반가속도와 최대지반속도의 비( $a/v$ )에 따라 분류되었으며, 자세한 사항들은 Table 1에서 보여주고 있다.

### 3.2.2 확률변수 및 한계상태

본 연구에서는 지진파, 콘크리트의 압축강도, 철근의 항복강도를 불확실성 요소로 결정하였다. 지진파는 Table 1에서 분류된 것처럼  $a/v$  값의 수준에 따라 여러 개의 지진파를 사용하여 해석함으로써 불확실성을 고려하였다. 반면에 콘크리트의 압축강도와 철근의 항복강도는 확률변수로서 불확실성을 고려하였고, 이들의 통계적 특성이 Table 2에 정리되어 있다.

한편 지진하중을 받는 구조물의 한계상태는 serviceability, damage control, collapse prevention으로 총 3가지로 구분 하였다. 구조물의 푸쉬오버 해석을 통해 각각의 한계상태에 해당하는 층간 횡방향 변형률 (ISD, Inter-story drift ratio)은 0.57%, 1.2%, 2.3%으로 구해졌으며[3, 13], 이들을 각각 LS1, LS2, LS3로 명명 하였다. 해석 모델의 기둥 부재 가운데 어느 하나라도 층간 횡방향 변형률이 정해진 기준에 도달하게 되는 경우

를 구조물의 한계상태로 보며, 한계상태함수는 식 6으로 표현할 수 있다. 식에서  $\max[\cdot]$ 는 최대값을,  $ISD_{C-1}, \dots, ISD_{C-48}$ 은 48개 기둥의 층간 횡방향 변형률을 의미한다.

$$\begin{aligned} LS1 : g(\mathbf{x}) &= 0.0057 - \max [ISD_{C-1}(\mathbf{x}), ISD_{C-2}(\mathbf{x}), \dots, ISD_{C-48}(\mathbf{x})] \leq 0 \\ LS2 : g(\mathbf{x}) &= 0.012 - \max [ISD_{C-1}(\mathbf{x}), ISD_{C-2}(\mathbf{x}), \dots, ISD_{C-48}(\mathbf{x})] \leq 0 \\ LS3 : g(\mathbf{x}) &= 0.023 - \max [ISD_{C-1}(\mathbf{x}), ISD_{C-2}(\mathbf{x}), \dots, ISD_{C-48}(\mathbf{x})] \leq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

### 3.2.3 해석 결과

예제 구조물인 3차원 RC 프레임 구조물에 대한 지진 취약도 곡선을 앞에서 제시된 방법을 통해 도출하였다. Fig. 5은 3가지 서로 다른 특성을 가진 입력지진파에 대한 구조물의 지진 취약도 곡선들을 보여준다.

Kwon과 Elnashai[13]는 동일한 구조물의 2차원 해석 모델에 대해 샘플링 기반의 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용해 지진 취약도 분석을 수행한 바 있는데, 그 결과를 Fig. 5와 비교해보면 매우 유사하다는 것을 알 수 있다. 그런데 Kwon과 Elnashai[13]는 비교적 구조해석 시간이 짧게 소요되는 2차원 모델을 사용했음에도 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용하기 위해 슈퍼컴퓨터에서 병렬컴퓨팅(parallel computing)을 사용한 반면, 본 연구에서는 구조해석에 시간이 길게 소요되는 3차원 모

Table 1. Input ground motions[3,13]

$a/v$ 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

Table 2. Statistical properties of random variables

Random variables	Mean (MPa)	Coefficient of variation	Distribution type
Concrete strength ( $f_c$ )	33.6	0.186	Normal
Steel strength ( $f_s$ )	336.5	0.107	Normal

델을 사용했음에도 퍼스널컴퓨터(3.60GHz CPU, 8GB RAM)을 이용해 상대적으로 짧은 시간에 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 본 연구에서 활용한 FERUM-ZEUS의 효율성을 보여주는 것으로써, 지진 취약성 평가에 3차원 구조해석 모델의 도입이 필요할 경우, 소프트웨어를 연결하여 FORM 해석을 수행하는 기법이 유용하게 활용될 수 있음을 나타낸다.

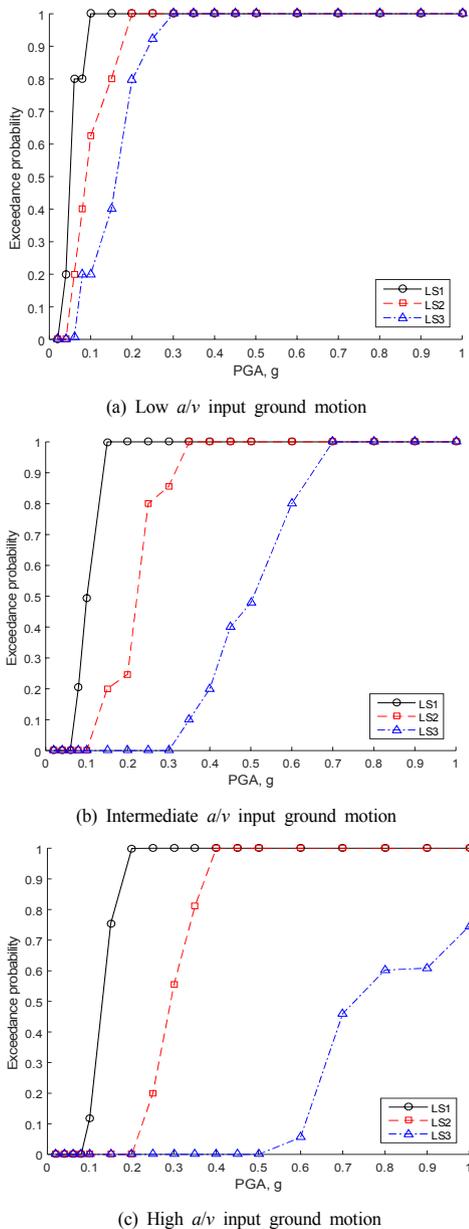


Fig. 5. Fragility curves for three types of input ground motion

아울러 Fig. 5의 세 가지 취약도 곡선을 비교해보면, 낮은 수준의  $a/v$ 를 갖는 입력 지진파에서 비교적 낮은 PGA(peak ground acceleration)에서도 손상을 입을 확률이 중간 또는 높은 수준의  $a/v$ 의 입력지진파에서보다 높다는 것을 알 수 있다. 이는 지진파의 유형이 지진 취약도 곡선에 큰 영향을 준다는 것을 나타내며, 따라서 특정 지역에서의 지진 취약도 곡선을 도출할 때에는 해당 지역에 어떤 유형의 입력 지진파가 발생할 확률이 가장 높은지에 대한 고려가 필수적이라 할 수 있다.

만약 이러한 입력 지진파 유형에 대한 조사가 어렵다면 보통은 세 가지 종류의 입력지진파가 동일한 발생 가능성을 갖는다는 가정 하에 각 취약도 곡선들의 평균을 취하게 된다. 이러한 방식으로 이번 연구에서의 예제 구조물인 3차원 RC 프레임 구조물에 대해 구한 지진 취약도 곡선은 Fig. 6과 같다.

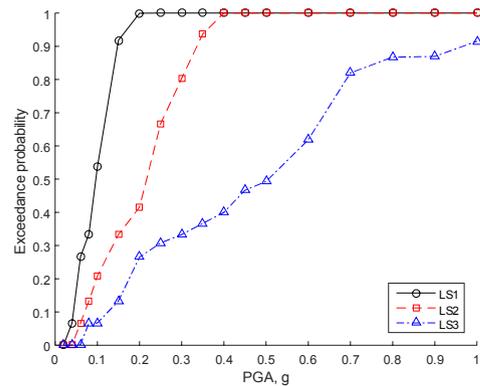


Fig. 6. Fragility curve of 3D RC frame example

#### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 구조물에 대한 정확하고 효율적인 지진 취약도 평가를 위해 대표적인 신뢰성 해석 소프트웨어인 FERUM, 내진 해석에 특화되어 있는 비선형 구조해석 소프트웨어인 ZEUS-NL, 그리고 이들 소프트웨어들을 연결시켜 주는 인터페이스인 FERUM-ZEUS을 활용하여 지진 취약도 곡선을 도출하는 방법이 제시되었다. 이 방법을 통해 3차원 해석 모델을 사용하면서도 효율적으로 지진 취약도 곡선을 성공적으로 도출할 수 있었다. 샘플링 기반의 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 동일한 예제 구조물에 대해 2차원 모델로 취약도

곡선을 도출한 기존 연구 결과와 비교해 보면, 본 연구에서는 3차원 모델을 이용하면서도 효율적으로 매우 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 입력지진파의 유형이 지진 취약도 곡선에 큰 영향을 주기 때문에, 특정 지역에서의 지진 취약도 곡선을 도출할 때에는 해당 지역에 어떤 유형의 입력 지진파가 발생할 확률이 가장 높은지에 대한 고려가 필수적임을 확인하였다.

## References

- [1] C.S. Chung, "Structural integrity evaluation of nuclear seismic category IIA 2" globe valve for seismic loads", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.9, No.6, pp.1500-1505, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2008.9.6.1500>
- [2] S. Jeong and A.S. Elnashai, "Probabilistic fragility analysis parameterized by fundamental response quantities", *Engineering Structures*, Vol.29, pp. 1238-1251, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.06.026>
- [3] D.S. Moon and Y.J. Lee, "A new methodology of the development of seismic fragility curves", *Smart Structures and Systems*, Vol.14, No.5 pp. 847-867, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2014.14.5.847>
- [4] A. Der Kiureghian. *Fisrt- and second-order reliability methods*. chap.14, CRC press, Boca Raton, FL, USA, 2005.
- [5] T. Haukaas, "Finite element reliability and sensitivity methods for performance-based engineering", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, CA, USA, 2003.
- [6] A.S. Elnashai, V.K. Papanikolaou and D. Lee. *ZEUS NL-A System for Inelastic Analysis of Structures*, User's manual, Mid-America Earthquake (MAE) Center, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, 2010.
- [7] A. Der Kiureghian and R.L. Taylor, "Numerical methods in structural reliability", *Proc. of the 4<sup>th</sup> International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP4)*, June, 1983.
- [8] P.L. Liu, H.Z. Lin, A. Der Kiureghian. *CalREL User Manual*. Report No. UCB/SEMM-89/18, University of California, Berkeley, CA, USA, 1989.
- [9] SwRI. NESSUS (ver 9.6), Southwest Reserch Institute, 2011[cited 2016 June 1], Available from: <http://www.nessus.swri.org>.
- [10] Y.J. Lee, J. Song and E.J. Tuegel, "Finite element system reliability analysis of a wing torque box", *Proc. of the 10<sup>th</sup> AIAA Nondeterministic Approaches Conference*, Schaumburg, IL, April, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2008-1718>
- [11] W.H. Kang, Y.J. Lee, J. Song and B. Gencturk, "Further development of matrix-based system reliability method

and applications to structural systems", *Struct. Infrastruct. E.*, Vol.8, No.5, pp. 441-457, 2012.

- [12] 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>
- [13] 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: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.07.010>

## 문 도 수(Do-Soo Moon)

[정회원]



- 2006년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부(토목공학석사)
- 2012년 12월 : Univ. of Illinois, Urbana-Champaign (토목공학박사)
- 2006년 2월 ~ 2007년 7월 : 서울대학교 지진공학센터 연구원
- 2013년 1월 ~ 현재 : Univ. of Illinois, Urbana-Champaign 박사후연구원
- 2015년 6월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 박사후연구원

<관심분야>

구조공학, 내진 해석 및 설계

## 이 영 주(Young-Joo Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부(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) 예담엔지니어링 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