철골모멘트 골조의 붕괴성능에 영향을 미치는 불확실성 분석

신 동 현¹ · 김 형 준^{1*}

¹서울시립대학교 건축공학과

Uncertainties Influencing the Collapse Capacity of Steel Moment-Resisting Frames

Dong-Hyeon Shin¹ and Hyung-Joon Kim^{1*}

¹Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

Abstract

In order to exactly evaluate the seismic collapse capacity of a structure, probabilistic approach is required by considering uncertainties related to its structural properties and ground motion. Regardless of the types of uncertainties, they influence on the seismic response of a structures and their effects are required to be estimated. An incremental dynamic analysis(IDA) is useful to investigate uncertainty-propagation due to ground motion. In this study, a 3-story steel moment-resisting frame is selected for a prototype frame and analyzed using the IDA. The uncertainty-propagation is assessed with categorized parameters representing epistemic uncertainties, such as the seismic weight, the inherent damping, the yield strength, and the elastic modulus. To do this, the influence of the uncertainty-propagation to the seismic collapse capacity of the prototype frame is probabilistically evaluated using the incremental dynamic analyses based on the Monte-Carlo simulation sampling with the Latin hypercube method. Of various parameters related to epistemic uncertainty-propagation, the inherent damping is investigated to be the most influential parameter on the seismic collapse capacity of the prototype frame.

Keywords : collapse capacity evaluation, incremental dynamic analysis, uncertainty-propagation, latin hypercube sampling, monte-carlo simulation

1. 서 론

성능기반 지진공학에 있어 지진하중에 의한 요구수준(seismic demand)과 구조물이 보유하고 있는 저항능력(capacity of structure)에 대한 정확한 예측은 매우 중요하다. 이를 위해 하중의 변동성, 재료특성 및 해석모델 등의 다양한 불확실성(uncertainty)은 반드시 고려되어야 하는 주요한 요소이다. 일반적으로 이러한 불확실성에 대해서는 과거의 누적된 경험에 기초하여 결정된 안전계수(safety factor)를 설계에 고려함으로써 반영되어 왔으나, 최근 들어 보다 합리적인 구조물 성능평가를 위해서 평가시 예상되는 요소들의 불확실성을 정량적으로 고려하는 확률론적 내진성능 평가방법이 주목받고 있다(Song, 2004).

Grant 등(1978), Porter 등(2000)의 연구에서는 구조해석 과정에서 발생할 수 있는 불확실성의 요인들을 분류하여 각각의 확률분포 모델을 체계화하였으며, Chryssanthopoulos 등(2000)의 연구에서는 이를 바탕으로 하여 재료적 불확실성이 구조부재의 강도에 미치는 영향에 대해서 평가하였다. Lee와 Mosalam(2005)의 연구에서는 확률론적 추정방법인 First-Order Second-Moment(FOSM) 방법을 이용하여 지진하중과 구조물 재료적 특성의 불확실성에 대한 RC 구조물 거동의 민감도를 분석하였다. Kim과 Han(2013), Shin과 Kim(2014)의 연구에서는 철근콘크리트 격간벽 시스템과 강재이력형 계진장치가 적용된 철골모멘트 골조의 내진성능평가 과정에서 발생할 수 있는 불확실성이 지진응답에 미치는 영향을 평가하였다. 최근에는 지진으로 인한 구조물의 손실평가에도 적용되고

* Corresponding author:

Tel: +82-2-6490-2763; E-mail: hyungjoonkim@uos.ac.kr

Received June 11 2015; Revised July 17 2015;

Accepted July 18 2015

©2015 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.

있으며, 평가과정에서 내재된 불확실성 전파를 확률적으로 고려한 경제적 손실편가 방법론이 다수 제안되었다(Jun *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2014).

이와 같이 구조물의 거동에 대하여 해석과정에서 내재된 불확실성이 전파되어 미치는 영향과 관련한 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고 현재까지의 연구들은 개별 불확실성 요인에 대한 구조물 거동의 민감도 분석이 대부분이며, 구조물의 붕괴수준까지 불확실성 전파로 인한 영향을 평가한 연구는 매우 드물다. 붕괴방지(collapse prevention) 수준의 성능 확보를 내진설계 목표로 하는 현행 내진설계기준(ASCE, SEI 7, 2010)에 의해 설계된 구조물에 대해서, 구조물이 적합한 내진성능을 확보하고 있는지는 붕괴성능평가를 수행하여 검토해야 한다. 또한 구조물의 성능은 개별 불확실성 요인들이 복합적으로 작용할 경우, 보다 심화된 불확실성 전파의 영향이 나타날 수 있으므로 이에 대해 정량적으로 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 붕괴성능평가에 있어 고려되는 불확실성의 요인들을 분류하여 각각의 확률분포 모델을 작성하였으며, 확률적 해석방법 중 가장 높은 신뢰도를 가지면서 효율적인 것으로 알려진 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용한 증분동적해석(incremental dynamic analysis)을 수행하여 불확실성을 고려한 붕괴성능평가를 수행하였다. 이 때, 각 개별 요인들의 불확실성 전파에 따른 붕괴성능의 민감도를 분석하였으며, 최종적으로 이들을 복합적으로 고려하였을 경우 구조물 붕괴성능의 변동성을 평가하였다.

2. 불확실성을 고려한 붕괴성능평가 방법

지진공학과 관련된 불확실성은 발생 원인으로부터 분류할 수 있으며 임의적 불확실성(aleatory uncertainty)과 인식론적 불확실성(epistemic uncertainty)으로 구분된다. 임의적 불확실성은 지반의 응력이력 등 자연적 원인에 의해 지반 운동의 특성이 변동하는 것을 의미하며, 이와 같은 불확실성을 감소시키는 것은 매우 제한적이다. 인식론적 불확실성은 불충분한 정보에 의해 발생하게 되며, 한정된 정보로 인해 모집단에 비해 표본숫자가 적은 경우 발생하게 되는 통계적 불확실성, 실험결과를 해석모델에 반영할 때 모델식의 결함이나 이상화의 의해 발생하는 오차 등과 같은 모델링 불확실성 등으로 구분할 수 있다. 이와 같은 불확실성은 충분한 데이터의 수집, 적용모델의 개선 등으로 감소시킬 수 있다.

최근 들어 구조물의 붕괴성능을 평가하기 위해 일반적으로 사용되는 증분동적해석(Vamvatsikos and Cornell, 2002)은 구조물의 응답이 탄성에서 붕괴가 발생할 때까지 지반가

Fig. 1 Methodology of Monte-Carlo simulation

속도를 점진적으로 증가시키며 비선형 동적해석을 수행하고 그 결과로 구조물의 응답을 관찰하여 시스템의 붕괴시점을 파악하는 해석방법이다. 다양한 파형 및 주파수 특성을 가진 지진파에 대해 지반 운동 강도를 점진적으로 증가시켜 평가를 한다는 측면에서 증분동적해석은 앞서 언급한 임의적 불확실성의 영향을 해석과정에서 고려할 수 있다. 하지만, 임의적 불확실성을 붕괴성능평가에서 고려하기 위해서는 기존의 증분동적해석에 확률적 평가방법이 결합되어야 하며, 본 연구에서는 이와 같은 확률적 붕괴성능평가를 통해 인식론적 불확실성의 영향에 대해 규명하고자 한다.

인식론적 불확실성을 고려한 확률적 붕괴성능평가를 수행하기 위해서 우수한 정확도로 인해 널리 사용되고 있는 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 확률적 평가방법으로 사용하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 Fig. 1과 같이 확률변수장(random variable field)에서 충분히 많은 수의 샘플을 채취하고 샘플을 정의하는 특성 값을 해석의 입력변수로 하여 결과값의 확률분포를 획득하는 방법이다. 본 연구에서는 해석의 입력변수로서 임의적 불확실성을 대표하는 변수들을 고려하였으며 이들의 평균과 표준편차로 정의되는 확률분포로부터 샘플을 추출하여 증분동적해석을 수행하였다. 증분동적해석은 추출된 표본의 수만큼 반복 수행하여, 인식론적 불확실성의 다양한 요인들 중에서 어느 한 요인의 불확실성 전파로 인해서 구조물의 붕괴성능이 불확실해지는 정도를 정량화할 수 있고 이 값으로부터 해당 요인에 대한 붕괴성능의 민감도를 계산할 수 있다.

3. 확률적 붕괴성능평가

3.1 표본전물 및 해석모델

본 연구에서는 불확실성을 고려한 구조물 붕괴성능의 평가

를 위해 Ramirez 등(2000)의 연구에서 사용한 3층 철골 특수모멘트골조를 표본건물로 선정하였다. 표본건물은 장변 방향으로 골조가 모두 강접합으로 연결되어 있어 횡력에 저항할 수 있도록 설계되었으며, 이 중에서 Fig. 2(a)에 점선으로 표시된 골조를 대상으로 2차원 해석을 수행하였다. 표본건물의 설계는 ASCE 7-10(ASCE/SEI, 2010)에 따라 진행하였으며, 지진력 저항시스템의 설계에 필요한 설계변수(반응수정계수, R , 초과강도계수, Ω_0 , 변위증폭계수, C_d , 중요도계수, I)는 Table 1에 제시하였다.

표본건물의 지진중량은 100% 고정하중과 25% 활하중으로 산정하였으며, 고정하중은 3.3kN/m^2 , 활하중은 1.68kN/m^2 이 적용되었다. 표본건물의 주기는 경험식에 의하여 0.70초이며, 이에 주기상한계수를 곱한 값을 이용하여 설계밀면전단력을 구하고 응답스펙트럼해석법에 의해 부재크기를 결정하였다. 설계된 부재크기는 Fig. 2(b)에 표기하였다.

표본건물의 증분동적해석을 수행하기 위해 비선형 해석 프로그램인 Ruaumoko 2D(Carr, 2009)를 사용하여 해석모델

Table 1 Seismic design parameters of the prototype frame

S_{DS}	S_{D1}	R	Ω_0	C_d	I
1.0	0.6	8.0	3.0	5.5	1.0

Fig. 2 Configuration of the prototype frame

을 작성하였다. 보 및 기둥 부재의 모델링은 전체 부재 길이를 나타내는 탄성요소와 각 양단에 소성힌지를 나타내는 비탄성요소로 연결되어 구성하였으며, 소성힌지의 이력모델은 1%의 항복 후 강성비를 가지는 이선형 모델(Bi-linear)을 사용하였다. 부재의 강도 결정을 위해 확률적인 안전율이 포함된 공칭 강도를 재료강도로서 사용하는 대신에 지진 발생시 강재가 발휘할 수 있는 예상항복강도를 재료강도로 적용하였다. 부재의 이력모델은 기둥의 축력비, 판폭두께비 등을 변수로 하여 철골 부재의 연성도를 평가하고 있는 FEMA 356(FEMA, 2000)의 모델링 변수를 적용하여 구현하였다. 동적 해석시 감쇠비는 5%로 가정하였다.

Table 2 Ground motions selected for the IDA

No	Earthquake	Station	PGA(g)	
			Comp.1	Comp.2
1	Northridge	Beverly Hills-Mulhol	0.416	0.516
2	Northridge	Canyon Country-WLC	0.410	0.482
3	Duze, Turkey	Bolu	0.728	0.822
4	Hector Mine	Hector	0.266	0.337
5	Imperial Valley	Delta	0.238	0.351
6	Imperial Valley	El Centro Array #11	0.364	0.380
7	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	0.509	0.503
8	Kobe, Japan	Shin-Osaka	0.243	0.212
9	Kocaeli, Turkey	Duzce	0.312	0.358
10	Kocaeli, Turkey	Arcelik	0.218	0.149
11	Landers	Yermo Fire Station	0.245	0.152
12	Landers	Coolwater	0.283	0.417
13	Loma Prieta	Capitola	0.529	0.443
14	Loma Prieta	Gilroy Array #3	0.555	0.367
15	Superstition Hills	El Centro Imp.Co.	0.358	0.258
16	Superstition Hills	Poe Road(temp)	0.446	0.300
17	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	0.385	0.549
18	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	0.353	0.440
19	San Fernando	LA-Hollywood Stor	0.210	0.174
20	Friuli, Italy	Tolmezzo	0.351	0.315

Fig. 3 Scaled spectral acceleration of ground motions

구조물의 지진응답을 평가하기 위해 PEER NGA Database (PEER, 2006)에서 제공되는 원단층 지반운동 데이터 중 20 쌍(총 40개)의 지진파를 사용하였다. Table 2에는 본 연구에 사용된 지진파의 목록과 최대지반가속도를 정리하고 있다. 지진파별 입력에너지가 상이하므로 이를 정규화하였으며, 정규화된 지진 데이터군에 대해서 스펙트럴 가속도의 평균값이 건물의 고유주기(T)를 기준으로 0.2배와 1.5배 사이에서 최대 급 지진의 스펙트럴 가속도 이상이 되도록 각 지진파에 보정계수를 곱하여 지반가속도의 크기를 Fig. 3과 같이 조정하였다.

3.2 임의적 불확실성의 영향평가

지반운동의 불확실성으로 대표되는 임의적 불확실성을 구조물 붕괴성능평가에서 고려하기 위해 Table 2에 제시된 40개 지진파에 대한 다중 증분동적해석을 수행하였다. 정규화된 지진파의 크기를 점진적으로 증가시켜서 비선형 시간이력해석을 수행하여 Fig. 4(a)와 같이 가로축이 지진파의 특정강도에 의

하여 나타나는 변위응답, 세로축이 표본건물의 1차 고유주기에서의 스펙트럴 가속도로 표현되는 IDA 곡선을 작성하였다. 구조물의 붕괴시점은 Vamvasikos와 Cornell(2002)의 연구에서 제시한대로 과도한 횡변위 발생 후 P- Δ 효과에 의해서 스펙트럴 가속도의 증가가 없는 상태에서도 최대 층간변위각이 지속적으로 증가하기 시작하는 지점으로 정의하였으며, 이는 IDA곡선이 초기 기울기의 20%가 되는 지점이다. 또한 Fig. 4(a)의 IDA곡선에 표시된 붕괴점 데이터를 로그정규분포로 가정하여 누적확률분포에 대한 포락곡선을 작성하여 Fig. 4(b)와 같은 취약도 곡선을 획득하였다. 증분동적해석결과, 표본건물은 고려된 40개의 지진파 중에서 1개의 지진파에 대해서 최대급 지진시 스펙트럴 가속도(S_{MT}), 1.28g 미만의 수치를 나타내어 10%미만의 붕괴확률을 나타내었다. 최대급 지진시 스펙트럴 가속도 대비 50%의 파괴확률을 보이는 스펙트럴 가속도(즉, 붕괴성능의 중간값(S_{CT}))의 비로 정의되는 붕괴여유비(Collapse Margin Ratio, CMR)는 2.02로 평가되어 표본건물이 충분한 붕괴성능을 확보하는 것으로 나타났다.

구조물의 붕괴성능은 일반적으로 구조물이 붕괴시점까지 저항할 수 있는 지반운동의 스펙트럴 가속도로 평가될 수 있다. 임의적 불확실성으로 인한 붕괴성능의 변동성(β_{AU})은 스펙트럴 가속도로 표현되는 지진파의 강도가 대수정규분포의 확률분포를 가지는 것(Lee and Mosalam, 2005)에 기인하여, 식 (1)과 같이 증분동적해석을 통해 획득한 붕괴점 분포의 표준편차를 계산하는 과정으로 산출된다. 이 때 중간값을 대표값으로서 고려하였다.

$$\beta_{AU} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln S_{a,i} - \ln S_a^{50\%})^2}{N-1}} \quad (1)$$

여기서, N 은 총 붕괴점의 개수이다. 또한 이는 근사적으로 식 (2)와 같이 증분동적해석을 통해 획득한 붕괴점 분포의 84번째 백분위수($S_a^{84\%}$)와 16번째 백분위수($S_a^{16\%}$)의 자연로그에 대한 평균값으로 계산할 수 있다. 이는 대수정규분포의 확률밀도함수에서 대표값 $\pm$ 표준편차($\mu \pm 1\sigma$)의 구간이 전체 확률의 68.2%에 해당하는 것에 기인한다.

$$\beta_{AU} = \frac{1}{2} (\ln S_a^{84\%} - \ln S_a^{16\%}) \quad (2)$$

표본건물의 붕괴성능평가를 통해 획득한 $S_a^{16\%}$, $S_a^{50\%}$, $S_a^{84\%}$ 은 각각 1.76g, 2.58g, 5.96g로 평가되었으며 이를 통해 산출된 임의적 불확실성으로 인한 붕괴성능의 변동성

(a) IDA curve

(b) fragility curve

Fig. 4 Probabilistic evaluation results considering aleatory uncertainties

(β_{AV})은 0.611의 수치로 산출되었다. 이때 표준편차와 대표값의 비로 정의되는 변동계수(coefficient of variation, COV)는 23.6%로 나타나, 임의적 불확실성의 전파로 인해 구조물의 붕괴성능이 비교적 높은 변동성을 나타냄을 확인할 수 있다.

3.3 인식론적 불확실성의 영향평가

기존의 증분동적해석과정에서 고려할 수 있었던 임의적 불확실성과 달리 인식론적 불확실성의 영향을 붕괴성능평가에서 고려하기 위해서는 확률적 평가방법인 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여야 한다. 이를 위해 임의적 불확실성과 관련된 확률변수들을 지진중량(M_s), 고유감쇠(D_p), 철골부재 항복강도(F_y), 철골부재 탄성계수(E_s)의 4가지 항목으로 구분하였으며 각각의 변수에 대한 확률분포 모델은 Ellingwood 등(1980)과 Porter 등(2002)의 연구를 참고하여 Table 3에 제시된 통계적 수치로 작성하였다. 이 때, 개별 변수의 복합된 영향을 고려하기 위해 지진중량과 고유감쇠는 인식론적 불확실성 중 해석모델의 불확실성(modelling uncertainty)을 대표하는 변수로 분류하였으며, 철골부재의 항복강도 및 탄성계수는 인식론적 불확실성 중 재료의 통계적 불확실성(statistical uncertainty)과 관련된 변수로 분류하여 고려하였다.

몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 인식론적 불확실성을 고려한 붕괴성능평가를 수행하기 위해서는 선택한 입력변수의 확률변수장에서 신뢰할 수 있는 수준의 충분히 많은 수의 샘플을 추출해야 한다. 증분동적해석의 특성상, 구조부재의 비선형성으로 인해 반복계산이 요구된다. 또한 비선형 동적해석의 반복수행을 통해 구조물의 붕괴점을 획득하기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여 신뢰성 높은 결과를 얻기에는 많은 계산시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 과도한 계산시간의 단축을 위해 라틴방격추출법(latin hypercube sampling, LHS)을 통해 입력변수의 표본을 추출하였다. 라틴방격추출법은 입력변수의 확률분포장에서 샘플을 추출할 때 균등한 분포빈도로 추출되도록 각 입력 변수의 범위를 i 개의 영역으로 나눈 뒤, 각 구간에서 하나씩 중복되지 않게 i

Table 3 The statistical characteristics of the input random variable related to the epistemic uncertainties

Source	Distribution	Mean	COV, %	Unit
Seismic weight, M_s	Normal	725	10.0	kN
Inherent damping, D_p	Lognormal	5.0	40.0	%
Yield strength, F_y	Lognormal	345	10.1	MPa
Elastic modulus, E_s	Lognormal	205,000	3.3	MPa

개를 뽑는 방법이다. 본 연구에서는 최소표본수를 50개로 결정하였으며, 개별 변수의 영향을 복합적으로 고려하는 경우에는 입력변수의 개수(n)×50개만큼의 표본을 추출하였다(Iman and Conover, 1982). 또한 추출된 표본수의 신뢰성을 확인하기 위해 Fig. 5와 같은 수렴도 해석을 수행하여 추출된 표본 집단의 변동계수가 5%미만이 되는 것을 확인하였다.

인식론적 불확실성의 붕괴성능에 대한 영향을 평가하기 위해서는 붕괴성능에 영향을 미치는 다른 변수들의 영향을 제거하는 것이 요구된다. 대표적으로 제거해야 할 변수는 임의적 불확실성으로서 Fig. 4(a)에서 중간값의 붕괴점을 나타낸 지진파(superstition hills, poe road)를 선택하여 지진파의 파형 및 주파수성분 등 지반운동과 관련된 불확실성을 제거하였다. 이와 같이 선정된 지진파를 기본 지진파로 하여 임의적 불확실성을 대표하는 변수들의 추출된 표본집단에 대한 반복해석을 통해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 6과 7에는 몬테카를로 시뮬레이션을 활용한 확률적 붕괴성능 평가결과를 제시하고 있다. Fig. 4(a)에서와 같이 임의적 불확실성을 고려한 붕괴거동은 IDA곡선이 해석 초기 단계에서부터 선택된 지진파의 종류에 따라 형상 및 기울기에 큰 차이를 나타내는 것과는 달리, 인식론적 불확실성을 고려한 표본 건물의 붕괴거동은 IDA곡선에서 볼 수 있듯이 낮은 스펙트럴 가속도의 해석단계에서는 큰 차이를 나타내지 않았으며 유사한 초기 기울기로 진행되다가 최대급 지진수준의 스펙트럴 가속도(S_{MT}) 이상이 되면 그래프 각 곡선간의 차이가 발생하기 시작하였다. 표준편차를 통해 인식론적 불확실성으로 인한 붕괴성능의 영향을 정량적으로 평가하면, 해석모델의 불확실성을 대표하는 구조물 고유감쇠(β_{M_s})와 지진중량(β_{D_p})으로 인해 각각 $\beta_{M_s}=0.186$, $\beta_{D_p}=0.245$ 의 표준편차를 가지는 것으로 나타났으며, 통계적 불확실성을 대표하는 철골부재의 항복강도와 탄성계수에 의해 각각 $\beta_{F_y}=0.129$, $\beta_{E_s}=0.093$ 의 표준편차를 가지는 것으로 평가되

Fig. 5 Convergence test for sampled input variables

Fig. 6 Probabilistic evaluation results considering the epistemic uncertainties related to the modelling uncertainty

Fig. 7 Probabilistic evaluation results considering the epistemic uncertainties related to the statistical uncertainty

Fig. 8 Collapse fragility curves

었다. 즉, 표본건물의 붕괴성능은 인식론적 불확실성을 대표하는 변수 중에서 구조물 고유감쇠에 가장 높은 민감도를 나타내었다.

표본건물의 붕괴성능에 대한 인식론적 불확실성을 대표하는 개별 입력변수의 복합된 영향을 평가하여, Fig. 8에 붕괴점의 분포로부터 획득한 붕괴 취약도곡선(collapse fragility curve)의 형태로 제시하였다. 개별 입력변수의 불확실성이 동시에 발생하였을 경우를 가정하여 복합된 영향을 평가한 결과, 해석모델의 불확실성(β_{Model})과 통계적 불확실성($\beta_{Statistic}$)은 각각 $\beta_{Model}=0.259$, $\beta_{Statistic}=0.188$ 의 표준편차로 붕괴성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 해석모델의 불확실성이 통계적 불확실성과 비교하여 27% 높은 붕괴성능의 변동성을 유발하였다. 입력변수를 개별적으로 고려하거나 이를 복합적으로 고려하는지에 상관없이 표본건물에 대해 50%의 붕괴확률

을 나타낼 때의 스펙트럴 가속도는 유사했으며, 이 시점을 중심으로 취약도 곡선의 형상이 변동하였다. 또한 개별 입력변수를 복합적으로 고려한 경우에 결정된 붕괴성능의 표준편차(β_{Model} , $\beta_{Statistic}$)는 각 개별 입력변수로 인한 붕괴성능의 표준편차(β_{Ms} , β_{Dp} , β_{Fy} , β_{Es})를 단순 합한 수치 미만으로 나타났으며, 보다 지배적인 영향을 나타내는 개별변수의 표준편차 수치에 따라 결정되는 경향을 나타냈다.

Fig. 9에는 인식론적 불확실성을 대표하는 모든 4가지 입력변수(지진중량, 구조물 고유감쇠, 철골부재의 항복강도 및 탄성계수)의 불확실성을 동시에 고려한 경우, 붕괴성능에 미치는 영향에 대해 평가한 결과를 제시하고 있다. 확률적 평가결과 획득된 붕괴점의 분포는 불확실성이 고려되지 않은 그래프 곡선의 붕괴점 주변에 산포되어 나타났으며, 붕괴시 층간변위비(Δ)의 산포도가 스펙트럴 가속도(S_a)의 산포도보

Fig. 9 Probabilistic collapse capacity evaluation considering multi parameters(β_{Ms} , β_{Dp} , β_{Fy} , β_{Ek}) representing the epistemic uncertainty

Table 4 Summary of collapse capacity evaluation results considering the epistemic uncertainties

	Individual parameter				Multi parameter		
	β_{Ms}	β_{Dp}	β_{Fy}	β_{Ek}	β_{Model}	$\beta_{statistic}$	β_{EU}
Spectral acceleration, $S_a(g)$	0.186	0.245	0.129	0.093	0.259	0.188	0.304
Story drift ratio, $\Delta(\%)$	0.63	0.73	0.52	0.52	0.89	0.79	0.91

다 크게 나타났다. 이는 표본건물 붕괴시 층간변위비가 스펙트럴 가속도보다 인식론적 불확실성의 전파에 민감함을 의미하며, Table 4에 제시된 표준편차 수치에서 이를 확인할 수 있다. 전반적으로, 인식론적 불확실성을 대표하는 각 개별 입력변수로 인해 붕괴시 층간변위비는 0.5 이상의 표준편차를 가지는 것으로 나타났고, 이들의 영향을 복합적으로 고려하면 0.91의 높은 표준편차를 가지는 것으로 평가되었다. 또한, Fig. 9에서와 같이 붕괴시 스펙트럴 가속도와 층간변위비의 분포를 히스토그램으로 치환하여 확률밀도함수를 작성하면 스펙트럴 가속도의 분포는 중간값을 기준으로 좌우 대칭에 가까운 대수정규분포의 확률밀도함수를 나타냈으며, 층간변위비의 분포는 중간값을 기준으로 0.1의 층간변위각 부근에 치우쳐진 대수정규분포의 확률밀도함수를 나타내었다.

최종적으로 모든 개별 입력변수의 복합된 영향을 고려한 경우, 즉, 인식론적 불확실성으로 인한 붕괴성능의 변동성(β_{EU})은 $\beta_{EU}=0.304$ 의 표준편차를 가지는 것으로 나타났으며 이는 불확실성을 고려하지 않았을 때의 붕괴성능과 비교하여 12%의 차이가 인식론적 불확실성이 전파되어 발생할 수 있음을 의미한다. 또한, 인식론적 불확실성의 영향은 임의

적 불확실성으로 인한 붕괴성능의 변동성, $\beta_{AU}=0.611$ 과 비교하여 50%수준의 영향을 가지는 것으로 평가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 구조물의 붕괴성능에 불확실성이 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서 붕괴성능평가에 고려되는 불확실성의 요인들을 분류하여 각각의 확률분포 모델을 작성하였으며, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 붕괴성능에 대한 불확실성 요인들의 민감도를 분석하였다. 또한 각 개별 불확실성 요인들이 동시에 발생한 경우를 가정하여 이들을 복합적으로 고려하였을 경우 붕괴성능의 변동성을 평가하였다. 이에 따른 결과는 다음과 같다.

- (1) 임의적 불확실성을 고려하여 붕괴성능평가를 수행한 결과, IDA곡선이 해석 초기단계에서부터 지진파의 종류에 따라 형상 및 기울기에 큰 차이를 나타내었으며, 이를 정량적인 수치인 표준편차로 평가하면 0.611로 산출되었다. 즉, 불확실성이 고려되지 않은 경우의 붕괴성능과 비교하여 임의적 불확실성의 전파로 인해

구조물의 붕괴성능이 23.6%의 변동성을 가지는 것으로 나타났다.

- (2) 인식론적 불확실성을 고려한 표본건물의 거동은 낮은 스펙트럴 가속도의 해석단계에서는 큰 차이를 나타내지 않았으며 최대급 지진수준의 스펙트럴 가속도 이상이 되면 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 획득한 IDA곡선 간에 차이가 발생하였다. 또한 표본건물의 붕괴성능은 인식론적 불확실성을 대표하는 변수 중에서 구조물 고유감쇠에 가장 높은 민감도를 나타내었다.
- (3) 개별 입력변수의 불확실성이 동시에 발생하였을 경우를 가정하여 복합된 영향을 평가한 결과, 해석모델의 불확실성(지진중량과 구조물 고유감쇠)이 통계적 불확실성(철골부재의 항복강도와 탄성계수)과 비교하여 27% 높은 붕괴성능의 변동성을 유발하였다. 이때 개별 입력변수를 복합적으로 고려한 경우에 결정된 붕괴성능의 표준편차는 지배적인 영향을 나타내는 개별 변수의 표준편차 수치에 따라 결정되는 경향을 나타냈다.
- (4) 인식론적 불확실성을 대표하는 모든 개별 입력변수의 복합된 영향을 고려한 경우 붕괴성능의 변동성은 0.304의 표준편차를 가지는 것으로 나타났으며, 이는 임의적 불확실성으로 인한 붕괴성능의 변동성과 비교하여 50%수준의 영향을 가지는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업(13AUDP-B066 083-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- ASCE/SEI (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineering, p.608.
- Carr, A.J. (2009) *Ruamoko Manual*, User Manual for the 2-Dimensional Version : Ruamoko 2D Vol.2, University of Canterbury, New Zealand.
- Chryssanthopoulos, M.K., Dymiotis, C., Kappos, A.J. (2000) Probabilistic Evaluation of behavior Factors in EC8-Designed R/C Frames, *Eng. Struct.*, 22, pp.1028~1041.
- Ellingwood, B., Galambos, T.V., MacGregor, J.G. (1980) *Development of a Probability-based Load Criterion for American National Standard A58*, Washington, D.C.
- FEMA (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., p.518.
- Grant, L.H., Mirza, S.A., MacGregor, J.D. (1978) Monte Carlo Study of Strength of Concrete Columns, *ACI J.*, 75(8), pp.348~358.
- Iman, R.L., Conover, W.J. (1982) A Distribution-free Approach to Inducing Rank Correlation among Input Variables, *Communication in Statistics Part B: Simul. & Comput.*, 11(3), pp. 311~334.
- Jun, S., Shin, D.H., Kim, H.J. (2014) Annual Loss Probability Estimation of Steel Moment-Resisting Frames using Seismic Fragility Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 27(6), pp. 517~524.
- Kim, J.K., Han, S.H. (2013) Sensitivity Analysis for Seismic Response of Reinforced Concrete Staggered Wall Structures, *Mag. Conc. Res.*, 65(22), pp.1348~1359.
- Lee, S.W., Lee, W.H., Kim, H.J. (2014) Seismic Fragility Functions for Steel Moment Resisting Frames using Incremental Dynamic Analyses, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 27(6), pp. 509~516.
- Lee, T.-H., Mosalam, K.M. (2005) Seismic Demand Sensitivity of Reinforced Concrete Shear-wall Building using FOSM Method, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 34(14), pp.1719~1736.
- PEER (2006) PEER NGA Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, U.S.A., Available at : <http://peer.berkeley.edu/nga/>.
- Porter, K.A., Beck, J.L., Shaikhutdinov, R.V. (2002) Sensitivity of Building Loss Estimates to Major Uncertain Variables, *Earthq. Spectra*, 18(4), pp.719~743.
- Ramirez, O.M., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Whittaker, A.S., Johnson, M.W., Gomez, J.D., Chrysostomou, C.Z. (2000) Development and Evaluation of Simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings with Passive Energy Dissipation Systems, Report No. MCEER 00-0010, Revision 1, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, N.Y., USA.

Shin, D.H., Kim, H.J. (2014) Probabilistic Assessment of Structural Seismic Performance Influenced by the Characteristics of Hysteretic Energy Dissipating Devices, *Int. J. Steel Struct.*, 14(4), pp.697~710.

Song, J.K. (2004) The Study on Evaluating Seismic Performance by Probabilistic Methodology and

Deterministic Methodology, Master thesis, University of Seoul, p.82.

Vamvatsikos, D., Cornell, C.A. (2002) Incremental Dynamic Analysis, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 31(3), pp.491~514.

요 지

구조물의 붕괴성능을 정확하게 평가하기 위해서는 구조물과 관련된 구조부재 및 지반운동의 불확실성을 고려한 확률적 접근방식이 요구된다. 불확실성의 종류에 상관없이 불확실성은 구조물의 응답에 영향을 미치게 되는데, 구조물의 성능목표를 설정함에 있어 이러한 불확실성 전파를 예측할 필요가 있다. 최근 들어, 구조물의 붕괴성능을 평가하는 방법으로 사용되고 있는 증분동적해석은 지반운동과 관련된 임의적 불확실성을 해석과정에서 고려할 수 있다는 장점이 있으나, 확률론적 평가를 위한 또 다른 중요 요인인 인식론적 불확실성을 직접적으로 평가할 수 없다는 제한사항이 있다. 본 연구에서는 철골모멘트골조를 표본 건물로 선정하여 인식론적 불확실 요인으로 정의한 구조물의 고유감쇠, 지진중량, 구조부재의 항복강도 및 탄성계수가 구조물의 붕괴성능에 미치는 영향을 확률적으로 평가하였다. 이를 위하여 라틴 방격 추출법을 사용한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 증분동적해석을 수행하여 구조시스템 붕괴성능의 변동성을 정량적으로 예측하였다. 해석결과, 붕괴성능의 변동성에 인식론적 불확실성을 대표하는 변수 중에서 구조물 고유감쇠의 영향이 가장 두드러지는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 붕괴성능평가, 증분동적해석, 불확실성 전파, 라틴 방격 추출법, 몬테카를로 시뮬레이션