

지진취약도를 통한 철골모멘트골조의 연간 손실 평가

전 새 미¹ · 신 동 현¹ · 김 형 준^{1*}

¹서울시립대학교 건축공학과

Annual Loss Probability Estimation of Steel Moment-Resisting Frames(SMRFs) using Seismic Fragility Analysis

Saemee Jun¹, Dong-Hyeon Shin¹ and Hyung-Joon Kim^{1*}

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

Abstract

The ultimate goal of seismic design is to reduce the probable losses or damages occurred during an expected earthquake event. To achieve this goal, this study represents a procedure that can estimate annual loss probability of a structure damaged by strong ground motion. First of all, probabilistic seismic performance assessment should be performed using seismic fragility analyses that are presented by a cumulative distribution function of the probability in each exceedance structural damage state. A seismic hazard curve is then derived from an annual frequency of exceedance per each ground motion intensity. An annual loss probability function is combined with seismic fragility analysis results and seismic hazard curves. In this paper, annual loss probabilities are estimated by the structural fragility curve of steel moment-resisting frames(SMRFs) in San Francisco Bay, USA, and are compared with loss estimation results obtained from the HAZUS methodology. It is investigated from the comparison that seismic losses of the SMRFs calculated from the HAZUS method are conservatively estimated. The procedure presented in this study could be effectively used for future studies related with structural seismic performance assessment and annual loss probability estimation.

Keywords : seismic fragility analysis, seismic performance assessment, seismic hazard curve, annual loss probability estimation

1. 서 론

최근 들어 일본과 인도네시아 등 전 세계적으로 규모 5이상의 강한 지진으로 인한 피해 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 우리나라는 비록 약한 규모의 지진이 드물게 발생하고 있으나 주변 국가의 지진 피해로 인해 지진 재난에 대한 경각심이 고조되고 있다. 우리나라 건축구조기준(AIK, 2009)은 인명피해를 최소화할 수 있도록 최소조건을 제시하고 있으며, 이를 건축물 내진설계의 기본개념으로 하고 있다. 따라서 구조물의 내용연수 동안 예상되는 지진에 대한 피해와 손실을 최소화하는 것이 내진설계의 최종적인 목표로 볼 수 있다. 이러한 목표를 만족시키기 위한 개념으로써 지진하중에 대한 구조물의 손상 확률을 나타내는 지진취약도(seismic

fragility analysis)를 작성하여 해당 구조물에 대한 내진성능을 평가하는 방법과 사례를 제시하는 많은 연구가 국내외에서 진행되었다(ATC, 1985; Beak *et al.*, 2012; FEMA, 2000; Kircher *et al.*, 1997; Ko *et al.*, 2009; NEMA, 2009). 하지만 보다 합리적인 내진성능 평가방법은 특정 지진이 아닌 구조물의 내용연수 동안 확률론적으로 발생하는 지진에 대한 피해와 손실을 정량적으로 예측하는 것이다. 이에 대한 방법 및 절차를 제시하는 연구는 아직 국내에서 활발하게 이루어지고 있지 않다.

반면 지진 발생이 잦은 외국의 경우, 지진으로 인한 구조물의 피해뿐만 아니라 2차적인 피해에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 특히, 미국 연방재난관리국(federal emergency management agency, FEMA)에서 개발한 지진피해 손실

* Corresponding author:

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

Received November 17 2014; Revised December 1 2014

Accepted December 2 2014

©2014 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.

예측 프로그램인 HAZUS(FEMA, 2003)는 구조물의 지진취약도를 이용하여 대상 지역 내 구조물에 대한 직·간접적인 피해를 정량적으로 예측한다. 또한 특정 기간에 발생 가능한 지진에 대한 피해를 평가할 수 있다. 이는 Cornell 등(2000), FEMA(2012) 등의 연구와 같이 지진위험도 곡선을 사용하여 계산하며, HAZUS에서는 미국 지질조사국(USGS)에서 제공하는 지진위험도를 사용한다. 그 결과 매년 건물에서 발생하는 경제적 손실의 평균을 예측할 수 있으며, 더 나아가 해당 구조물의 내용연수 동안의 손실을 평가하여 지진피해로 인한 손실을 최소화하는 대책 마련의 근거자료로 사용할 수 있다.

우리나라는 중약진 지역에 속하기 때문에 과거 지진 피해에 대한 구체적인 사례가 없으므로, 구조물의 예상되는 손실을 정량적으로 평가하고 예측하여 효과적인 대책마련을 해야 할 것이다. 본 연구에서는 지진하중과 구조물에 내재되어 있는 불확실성을 고려하여 구조물의 취약도를 작성하고, 발생 가능한 지진에 대한 강도별 연간 초과확률(annual frequency of exceedance)로 표현되는 지진위험도(seismic hazard curve)에 의한 해당 구조물의 지진 손실의 발생빈도를 산정하는 절차를 제시하고자 한다. 뿐만 아니라, 미국 강진 지역의 지진하중을 고려하여 설계된 철골모멘트골조를 표본건물로 선정하여 본 연구의 방법론의 결과를 제시하고, HAZUS의 철골모멘트골조에 대한 손실 평가결과를 비교하여 본 연구의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 확률론적 지진 손실 예측 방법

2.1 구조물의 지진취약도 분석법

본 연구에서는 HAZUS의 지진취약도 분석법(seismic fragility analysis)에 의거하여 구조물이 가지는 고유한 특성을 반영하고자 구조물의 응답, 즉 스펙트럴 변위(spectral displacement)를 지표로 지진취약도를 작성한다. 또한 HAZUS 지진취약도 분석법의 근간이 되는 ATC-40(ATC, 2003)에서 제시하는 역량스펙트럼법(capacity spectrum method)에 따라 구조물의 비탄성 최대응답으로 대표되는 성능점(performance point)을 산정하여 구조물의 취약도를

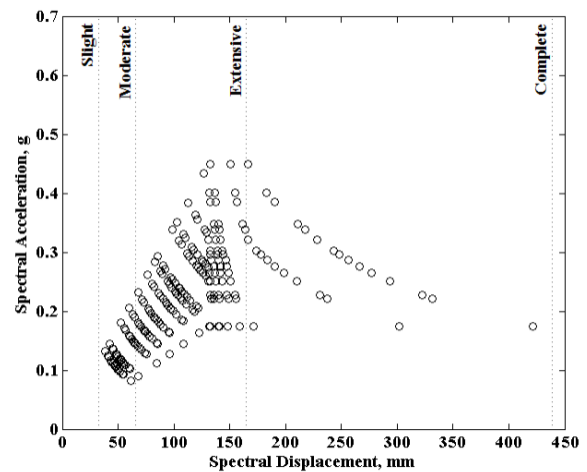
평가하고자 한다.

지진취약도는 지진강도에 따른 구조물의 응답에 대해 특정한 손상을 초과할 확률로 표현된다. 지진하중에 의한 구조물의 손상정도를 나타내는 척도는 구조물의 손상정도를 정량적인 지표로 나타낸 것으로써, HAZUS에서는 이 지표를 손상상태(damage state)라고 한다. 손상상태는 Slight(미세 손상), Moderate(중간 손상), Extensive(심각한 손상), Complete(완전 붕괴)의 4단계로 구분한다.

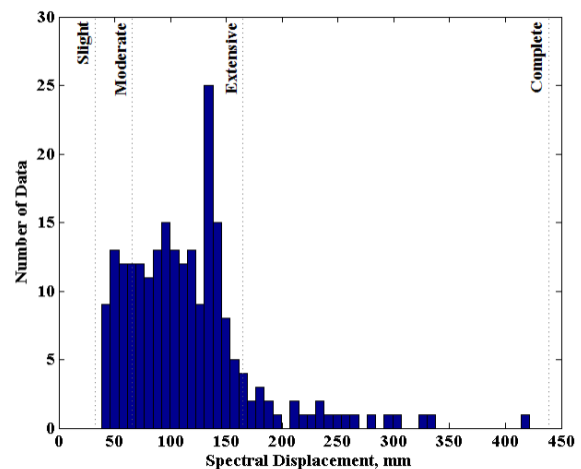
구조물의 응답이 손상상태, ds 를 초과할 확률은 식 (1)로 표현된다.

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (1)$$

여기서, Φ 는 표준정규적분포함수를 의미하며, $\bar{S}_{d,ds}$ 는 구조물이 특정한 손상상태, ds 의 한계치에 도달할 때의 스펙



(a) Sampling of performance points



(b) Histogram

Fig. 1 Sampling results using monte carlo simulation (PGA=0.2g)

Table 1 Uncertainties(Variabilities)

Type	Description
β_M	0.4
β_C	0.25 for Code building 0.30 for Pre-Code building
β_D	0.45 for $\beta_{D(Acceleration)}$ 0.50 for $\beta_{D(Velocity)}$

트립 변위의 중앙값으로 손상상태를 정의하는 층간변위비와 구조물의 높이를 곱한 값이다. 또한 β_{ds} 는 손상상태, d_s 의 층 변동성을 나타내는 대수표준편차이며 식 (2)와 같다.

$$\beta_{ds} = \sqrt{(CONV[\beta_C, \beta_D])^2 + (\beta_M)^2} \quad (2)$$

취약도곡선의 기울기를 결정하는 대수표준편차, β_{ds} 는 3가지의 변동성(구조물의 성능에 대한 변동성, β_C , 지진하중에 대한 구조물 응답의 변동성, β_D , 손상도 기준 추정치에 대한 변동성, β_M)으로 구성된다. β_M 은 손상도 기준을 추정하는데 포함되는 불확실성으로, β_C 와 β_D 에 대해서 독립으로 가정하며, 최종적인 불확실성은 SRSS 방법으로 산정된다. 각 대수표준편차 값은 Table 1에 제시된 바와 같다.

본 연구에서는 표본건물의 성능과 지진하중에 대한 응답을 고려하여 표본건물의 취약도를 도출하고자 라틴방격추출을 바탕으로 한 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 적용하여 대수표준편차를 산정한다. 표본건물의 역량스펙트럼과 각 지반강도별 요구스펙트럼의 발생확률이 같도록 각 15개씩 샘플을 채취하여 그 교점인 성능점이 각 손상상태 한계치(이하 손상도 기준)를 초과할 확률을 계산하여 $CONV[\beta_C, \beta_D]$ 를 추정한다. 예를 들어, Fig. 1은 PGA가 0.2g일 때 샘플링한 성능점과 히스토그램이며 이로부터 각 손상도 기준을 초과하는 확률을 계산할 수 있다. 이 때 각 PGA별 성능점의 로그누적분포로부터 취약도함수를 도출한다.

2.2 연간 손실 예측 방법

구조물의 연간 손실은 매년 구조물에서 발생하는 경제적 손실로써, 본 연구에서는 연간 손실 예측 연구의 근간이 되는 Cornell 등(2000)이 제안한 framework 식을 발전시켜 연간 손실을 예측하고자 한다. 즉, 특정 구조물의 내진 성능에 대한 연속적이고 정량적인 지표를 평가하고자 PGA로 표현되는 지진강도 및 그 발생빈도와와의 관계로 정의되는 해당 지역의 지진 위험도(seismic hazard curve)와 구조체 응답과 관련된 변수를 중점적으로 고려하여 구조물의 연간 손실을 예측한다. 이는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$P(loss) = \int_0^\infty P(ds|S_d) \lambda(S_d) dS_d \quad (3)$$

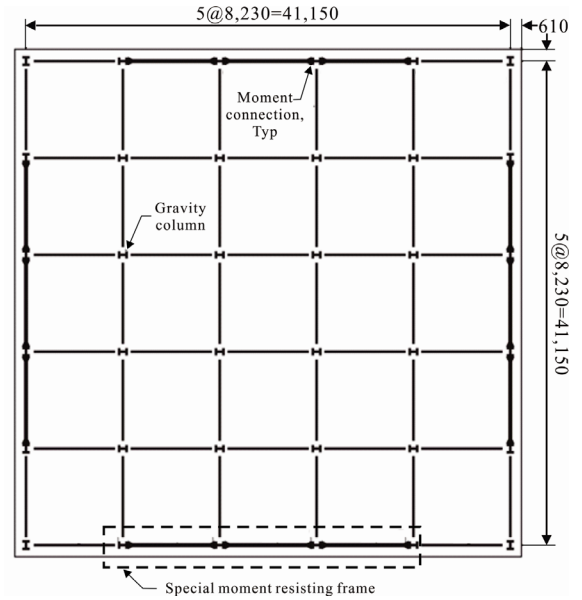
여기서, $P(ds|S_d)$ 은 역량스펙트럼법으로 도출한 성능점의 스펙트럼 변위, S_d 를 초과하는 손상 지표의 발생확률으로써

구조물의 지진취약도이다. $\lambda(S_d)$ 는 재현주기별 연간 초과확률로 표현되는 지진위험도이다. 따라서 HAZUS에서 제공하는 손상도 기준, $S_{d,ds}$ 와 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 산정한 대수표준편차, β_{ds} 로부터 구조물의 지진취약도를 작성한 후, 미국 지질조사국(USGS)에서 제공하는 해당 지역의 지진 위험도로부터 스펙트럼 변위로 표현되는 지반강도의 범위에 대하여 취약도를 적분하면 연간 초과확률을 구할 수 있다.

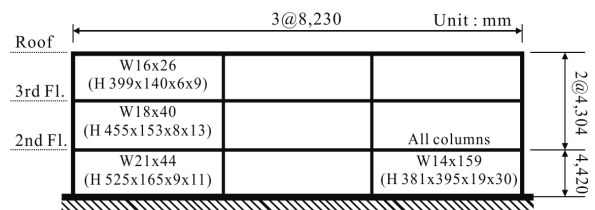
3. 표본건물 선정 및 해석모델의 수립

3.1 표본건물 선정

철골모멘트골조의 손실평가를 위하여 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 평면을 가진 3층 철골특수모멘트골조를 표본건물로 선정하였다. 이는 Ramirez 등(2000)의 연구에서 설계된 건물로써, 미국 강진지역인 샌프란시스코 지역에 위치한 건물로 가정하였다. 이 중 Fig. 2에서와 같이 점선으로 표시된 골조를 대상으로 2차원 해석을 진행하였으며, 이는 장변 방향으로 4개의 골조가 모두 강접합으로 연결되어 있어 횡력에 대해 모멘트로 저항한다.



(a) Plan of prototype frame



(b) Elevation of prototype frame

Fig. 2 Design results of SMRFs

Table 2 Seismic design parameters of steel moment resisting frames (SMRFs)

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

ASCE 7-10(ASCE, 2010)에 따라 진행하였으며, 표본건물의 단주기와 1초주기의 탄성 가속도 응답스펙트럼과 지진력 저항시스템 설계에 필요한 설계변수(반응수정계수 R , 변위증폭계수 C_d , 초과강도계수 Ω_0 , 중요도계수 I)는 Table 2과 같다. 표본건물의 고정하중은 3.35kN/m^2 , 활하중은 1.68kN/m^2 이 적용되었으며, 지붕층의 경우 고정하중은 1.68kN/m^2 , 활하중은 0.96kN/m^2 이 적용된다. 모든 구조물에 대하여 내진등급 I 를 적용하여 허용층간변위를 $0.020h$ (h = 층고)로 제한하도록 설계되었다. 이 때 보 및 기둥 부재는 50ksi ($F_y = 345\text{MPa}$) 강재를 사용하였고, 설계된 건물의 보 및 기둥의 크기는 Fig. 2에 나타내었다.

3.2 구조해석모델

구조물의 내진성능을 수치적으로 평가하고자 할 때, 해석 모델은 지진발생 시 구조물의 지진응답을 정확하게 예측할 수 있도록 구조부재의 비선형 이력거동을 적절히 묘사할 수 있어야 한다. 하지만 이러한 사항을 해석 모델상에 정확히 구현하기에는 현실적 제약이 존재한다. 따라서 본 연구에서 지진해석에 사용되는 해석모델은 합리적인 가정을 바탕으로 해석목적에 맞게 단순화 과정을 거쳐 수립되었다.

표본건물의 거동양상을 분석하기 위해 비선형 해석프로그램인 Ruaumoko2D(Carr, 2009)를 사용하였다. 표본건물의 초기강성을 이용한 5%의 Rayleigh damping 모델을 고유감쇠모델로 사용하였고, 안정적인 해석결과를 얻기 위하여 Newmark-Beta법과 지진파의 측정간격의 절반을 해석간격으로 설정하였다(Chopra, 2001).

부재의 이력모델은 FEMA 356(FEMA, 2000)에 제시된 부재 연성도 모델링 변수를 적용하였다. FEMA 356에서는 주요부재가 휨에 의해 지배되는 경우에 기둥의 축력비, 판폭 두께비 등을 변수로 하여 철골 부재의 이력곡선에 대한 모델링 파라미터를 제시하고 있다. 주요 변수 중에서 축력비에 해당하는 부분은 공칭축강도 대비 계수축력의 비가 높아짐에 따라 연성도를 취성파괴에 준하게 평가한다는 특징을 가지고 있다. FEMA 356에 근거하면 특정한 실험결과를 사용하지 않는 경우에 항복 후 강성비를 탄성강성의 1%라는 고정된 값으로 제시하고 있으며 본 연구에서는 이에 준하여 이력모

델을 구현하였다. 기둥과 보의 해석모델은 부재 양단부에 소성힌지가 위치하며 중앙부는 탄성요소로 구성된다. 소성힌지의 이력모델은 이선형 모델(Bi-linear)을 사용하여 모델링하였으며, 소성힌지 길이, l_p 는 식 (4)와 같이 가정하여 적용하였다.

$$l_p = d_c/2 + d_b \tag{4}$$

여기서, d_c 는 기둥의 유효 춤, d_b 는 보의 유효 춤이다. 기둥과 보의 접합부인 패널존은 강체연결요소를 이용하였다.

3.3 비선형 정적해석

표본건물의 손실평가를 수행하기에 앞서, 비선형 정적해석을 수행하여 구조물의 전반적인 파괴 메커니즘을 확인하고 해석모델의 적절성을 판단하였다. 비선형 정적해석을 위한 중력하중은 100% 고정하중과 25% 활하중으로 산정하였으며, 횡변위는 구조물의 1차모드형상으로 제어하였다.

앞서 작성한 해석모델의 밀면전단력, 변형능력, 파괴시점 그리고 파괴 메커니즘을 그림으로 도식화한 Push-over curve를 Fig. 3에 제시하고 있다. 여기서 소성힌지에 표기된 숫자는 소성힌지의 발생 순서를 나타낸다. 이와 같은 비선형 정적해석 결과로 초과강도 계수, $\Omega_0 = 2.32$ 를 산출하였으며, 이는 철골특수모멘트골조에 대한 ASCE 7-10(ASCE, 2010)의 제시 값에 근접한 수치로 평가되었다. 해석모델의 밀면전단력은 약산주기($T_a = 0.6$ 초)를 기반으로 한 설계밀면전단력, V_d 는 789.3kN을 상회하는 수치(약 1,830kN)를 나타내었다. Push-over curve의 이상화한 곡선은 관련 논문(Ramirez et al., 2000)과 FEMA P695(FEMA, 2009)를 참조하여 점선

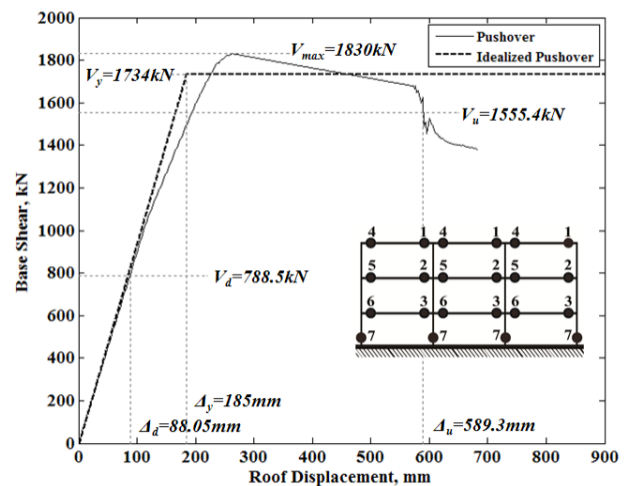


Fig. 3 Results of the nonlinear static analysis

으로 표현하였다. 파괴모드는 상층부 보부재에서 우선적으로 항복이 시작되어, 이후 저층부로 소성힌지의 분포가 전파되었으며, 최종적으로는 1층 기둥의 고정단부가 항복하는 결과가 나타났다.

4. 연간 손실 평가결과

4.1 표본건물의 지진취약도 분석

지진취약도는 구조물의 응답, 즉 스펙트럴 변위에 대한 손상상태의 초과 확률이다. 본 연구에서는 Table 3에 제시된 HAZUS의 철골모멘트골조의 손상도 기준을 사용하고 몬테카를로 시뮬레이션으로 도출한 표본건물의 대수표준편차, β_{ds} 로 지진취약도를 분석하였다.

Fig. 4와 Table 4는 표본건물과 HAZUS 철골모멘트골조의 지진취약도 분석 결과이다. HAZUS와 동일한 손상도 기준일 때 대수표준편차는 손상상태 Slight, Moderate, Extensive는 전반적으로 오차를 20% 미만의 유사한 결과를 보이지만, Complete일 때에는 구조물의 응답이 커질수록

Table 3 Spectral displacement used to median value of steel moment-resisting frame fragility curve, 3rd Floor, high-code seismic design level (FEMA, 2003)

	Slight	Moderate	Extensive	Complete
S_d (mm)	33.02	65.79	164.59	438.91

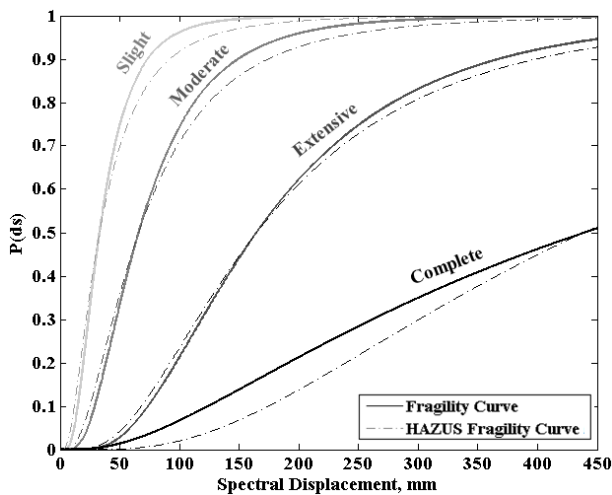


Fig. 4 Results of fragility analysis for SMRFs

Table 4 Standard deviation of logarithm of spectral displacement of damage states

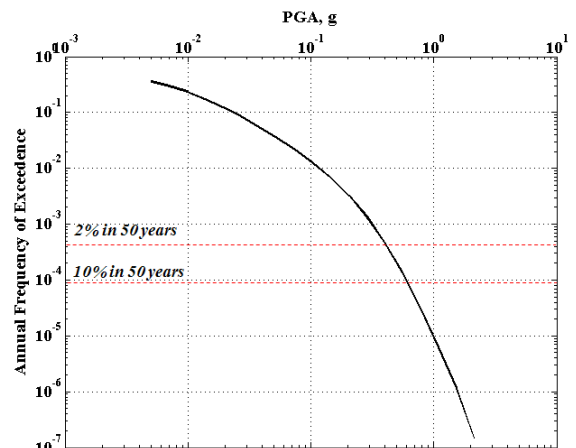
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
HAZUS	0.80	0.76	0.69	0.72
SMRFs	0.64	0.63	0.62	0.98
Error(%)	19.81%	16.11%	9.33%	35.63%

HAZUS에 비해 과대평가 하는 경향이 있다. 이는 HAZUS에서는 다양한 철골모멘트골조 모델에 대한 해석 결과를 토대로 도출한 대푯값인 반면 본 연구의 결과는 하나의 형태인 철골모멘트골조를 대상으로 한 취약도 곡선이기 때문에 사료된다. 또한 손상도 기준을 표본건물의 변형능력과 내진성능을 고려하지 않고 HAZUS에서 제공하는 대푯값으로 사용했기 때문에 사료된다.

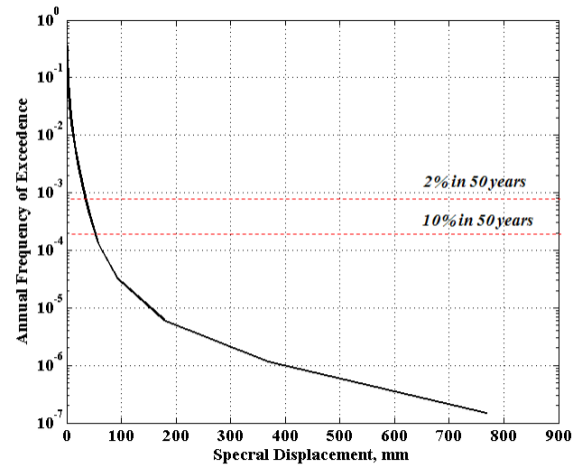
4.2 연간 손실 예측결과

본 연구의 결과로 도출한 지진취약도와 표본건물이 위치한 지역의 지반강도 별 연간 초과확률을 고려하고, 식 (3)에 의거하여 구조물의 연간 예상되는 지진피해에 대한 손실을 예측할 수 있다.

Fig. 5(a)는 재현주기별 연간 초과확률로 표현되는 지진 위험도 곡선이다. 본 연구에서는 스펙트럴 변위를 기반으로 구조물의 취약도를 평가하고 이에 따른 연간 손실을 예측하고자 하므로, 다음의 방법대로 PGA를 스펙트럴 변위로 변환

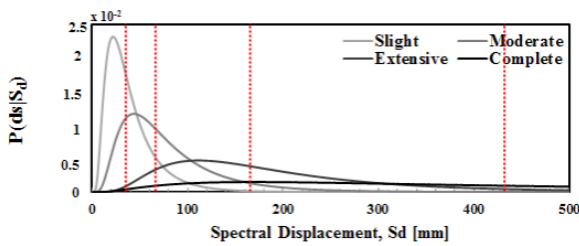


(a) PGA

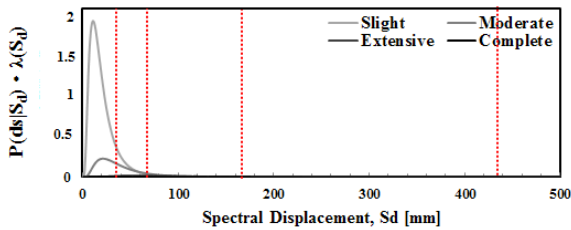


(b) Spectral displacement

Fig. 5 San Francisco Bay hazard curve



(a) Probability density function of fragility curve



(b) Annual loss probability

Fig. 6 Annual loss probability estimation for SMRFs

한다. PGA는 설계스펙트럼을 이용하여 스펙트럴 가속도, S_a 로 변환하고, 스펙트럴 가속도, S_a 는 구조물의 동특성에 따라 스펙트럴 변위, $S_d(=S_a/\omega^2)$ 로 적용된다. 그 결과는 Fig. 5(b) 및 Table 4과 같다.

일반적으로 손상상태별 지진취약도 곡선은 누적분포함수(cumulative density function, CDF)로 표현되기 때문에 이를 Fig. 6(a)와 같이 확률밀도함수(probability density function, PDF) 곡선으로 나타낸 후, 지진위험도 곡선의 초과확률과 곱하여 스펙트럴 변위의 범위로 적분하여 구조물의 연간 손실 발생확률을 산정한다.

1년간의 표본건물이 위치한 지역에서 발생할 지진강도에 대한 손상상태별 손실 예측결과는 Fig. 6(b)와 같으며, 각 손상상태별 연간 손실 발생확률은 Table 6에 제시된 결과와 같다. 전체적으로 HAZUS의 철골모멘트골조에 대한 연간 손실 확률이 표본건물의 손실 확률보다 보수적임을 알 수 있다. 이는 이미 언급한 바와 같이, HAZUS에서 사용하는 값이 수많은 데이터를 토대로 도출한 대푯값이기 때문이다. 또한 손상상태가 Complete일 때, 지진취약도 결과와는 달리 1년간 손실확률은 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 지반강도가 높을수록, 즉 스펙트럴 변위 값이 커질수록 연간 초과확률이 현저히 작기 때문에, Complete일 경우 지진취약도의 오차가 크지 않다면 손실에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

이를 토대로 구조물의 내용연수 동안 지진으로 인하여 피해를 입을 확률을 산정할 수 있다. 각 연도의 손실 발생은 전년에 대해 독립적이므로 식 (5)와 같이 계산한다.

Table 5 Hazard curve data

Annual frequency (%)	Return period (year)	PGA (g)	Spectral displacement (mm)
1.77	50	0.20	20.55
0.93	100	0.28	28.71
0.50	200	0.37	37.62
0.42	250	0.40	40.42
0.15	500	0.56	56.97
0.10	1000	0.66	66.79
0.04	2400	0.78	78.76
0.02	4800	0.94	94.74

Table 6 Annual loss probability

Class	Slight	Moderate	Extensive	Complete
SMRFs	0.40%	0.09%	0.02%	0.01%
HAZUS	0.55%	0.16%	0.03%	0.01%

Table 7 Probable loss in 40 years

Class	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Sum
P(loss)	14.86%	3.61%	0.71%	0.30%	19.48%

$$P(loss|Y) = 1 - (1 - P(loss))^Y \quad (5)$$

여기서, Y 는 연도이다. 일반적인 철골 구조물의 내용연수는 40년으로 고려되므로 40년간 표본건물의 지진 손실 발생 확률은 약 19.5%인 것으로 예측되며, 각 손상상태별 확률은 Table 7에 제시되어 있다.

본 연구에서는 확률론 기반으로 표본건물의 지진취약도를 작성하고 이를 이용하여 연간 손실확률을 도출하였다. 이 확률에 보수 비용, 손실 비용 등 구하고자 하는 손실에 대한 값을 곱하면 정량적인 연간 손실을 산정할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 본 연구의 방법으로 구한 손실과 구조물의 내진성능 수준을 토대로 구조물의 재설계 혹은 보강을 통하여 최소한의 손실이 발생하도록 조정할 수 있으며, 본 연구의 연간 손실 평가 방법론을 토대로 하여 향후 국내건물 적용시 연간 손실 발생을 정량적으로 평가할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 확률론적 기반의 위험도와 구조물의 취약도를 산정하여 구조물의 내진성능을 구하고, 이를 바탕으로 해당 지역의 지반 운동 특성을 고려하여 연간 손실 발생을 정량적으로 예측하는 방법을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 미국 샌프란시스코 지역에 위치한 철골모멘트골조를 표본건물로 선정하여 지진취약도를 통한 내진성능 평

가 결과, 손상상태가 Complete인 경우 HAZUS에서 제시하는 철골모멘트골조의 결과에 비해 과대평가됨을 알 수 있다.

- (2) 표본건물에 대해 내용연수 동안의 손실을 평가한 결과, 40년간 19.5%의 손실이 발생할 것으로 예측되었다. 이를 토대로 제진장치 설치 등의 보강 혹은 재설계를 통해 구조물의 손실을 최소화하는 방안을 마련하는데 근거 자료로 사용될 수 있을 것이다.
- (3) 전반적으로 손상상태 4단계(slight, moderate, extensive, complete)에 대한 연간 손실 확률은 HAZUS의 결과가 보수적임을 알 수 있다.
- (4) 본 연구에서 제안한 연간 손실 발생확률 산정방법을 토대로 하여 향후 국내 구조물의 내진성능 및 연간 손실 평가를 주제로 한 관련 연구에 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업단(자연피해예측및저감연구개발사업)의 지원으로 수행한 '지진재해로 인한 사회·경제적 피해예측 모델 개발'(NEMA-자연-2012-67) 과제의 성과입니다.

References

- AIK (2009) *Korean Building Code for Structures*, KBC 2009, Architectural Institute of Korea, Seoul, p.769.
- ATC (1985) *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, ATC-13, Applied Technology Council, California, p.492.
- ATC (1996) *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Vol. 1*, ATC-40, Applied Technology Council, California, p.346.
- ASCE (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers, Virginia, p.658.
- Beak, D.G., Kwon, K.H., Kim, J.K. (2012) Fragility Analysis of Staggered Wall Structures, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25(5), pp.397~404.
- Carr, A.J. (2009) *Ruaumoko Manual. User Manual for the 2-Dimensional Version : Ruaumoko 2D Vol. 2*, University of Canterbury, New Zealand, p.98.
- Chopra, A.K. (2012) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 4th Edition*, Prentice Hall, New Jersey, p.992.
- Cornell, C.A., Krawinkler, H. (2000) Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment, 3(2), PEER Center News, <http://peer.berkeley.edu/news/2000spring/index.html>.(accessed Nov., 14, 2014)
- FEMA (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., p.518.
- FEMA (2003) *HAZUS-MH MR4 Technical Manual, Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., p.712.
- FEMA (2009) *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, FEMA P695, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., p.421.
- FEMA (2012) *Seismic Performance Assessment of Buildings Vol. 1*, FEMA P-58-1, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., p.319.
- Kircher, C.A., Whitman, P.V. (1997) Estimation of Earthquake Losses to Buildings, *Earthquake Spectra*, 13(4), pp.703~720.
- Ko, H., Park, Y.K., Lee, D.G. (2009) Fragility Analysis of RC Moment Resisting Frame with Masonry Infill Walls, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 22(4), pp.355~362.
- NEMA (2009) Development of the Seismic Fragility Function for Buildings in Korea, National Emergency Management Agency in Korea, Seoul, p.418.
- 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, MCEER 00-0010, Revision 1, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo.

요 지

구조물의 내용연수 동안 예상되는 지진에 대한 피해와 손실을 최소화하는 것이 내진설계의 최종적인 목표로 볼 수 있다. 이러한 목표를 만족시키기 위한 개념으로 지진하중에 대한 구조물의 손상확률을 나타내는 지진취약도를 작성하여 지진에 대한 구조물의 확률론적 성능평가를 수행한 후, 해당 지역에서 발생 가능한 지진에 대한 연간 초과확률로 표현되는 지진위험도를 활용하여 연간 손실 발생확률을 산정하는 절차를 제시한다. 본 연구는 미국 강진지역의 지진하중을 고려하여 설계된 철골모멘트골조에 대해 취약도를 정량적으로 평가하고 연간 손실 발생확률을 예측하다. 또한 HAZUS의 철골모멘트골조 대표건축물에 대한 손실 평가결과를 비교하였으며, 그 결과 HAZUS에 의한 연간손실이 보수적으로 산정됨을 알 수 있었다. 제시된 방법으로부터 해당 구조물의 내진성능 및 연간 손실 평가를 할 수 있으며, 향후 관련 연구에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지진취약도, 내진성능평가, 지진위험도, 연간 손실 확률