

한반도에 적합한 지역별-주기별 지진위험지도 구축

Construction of a Site- and Period-Specific Seismic Hazard Map for the Korean Peninsula

지현우* · 한상환**

Jee, Hyun Woo*, and Han, Sang Whan**

Abstract

The 2016 Gyeongju and 2017 Pohang earthquakes caused casualties and economic damage in the surrounding areas. Therefore, the importance of earthquake damage prediction and seismic design in the Korean peninsula has increased. Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) is one of the well-known methods for predicting earthquake damage. The objective of this study is to construct Korean Peninsula seismic hazard maps of 5% damped response spectrum acceleration and peak ground acceleration, using PSHA. To consider the local effects for each site's classification, seismic hazard maps were constructed by considering the site amplification model. To conduct seismic design, uniform hazard response spectra (UHRS) were also constructed for the Korean peninsula.

Key words : Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Site Amplification Model, Stochastic Point-source Model, Ground Motion Prediction Equations, Uniform Hazard Response Spectrum

요 지

2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진이 발생하여 주변 지역에 인명 피해와 경제적 피해를 입힌 이래로, 한반도 지역에서의 지진피해 예측과 내진 설계에 대한 연구에 대한 관심이 증가하고 있다. 확률론적 지진재해도 해석은 지진피해 예측을 위한 널리 알려진 방법 중에 하나이다. 본 연구의 목표는 확률론적 지진재해도 해석을 수행하여 최대 지반 가속도와 5% 감쇠비 적용된 응답스펙트럼 가속도에 대한 한반도 지역의 지진위험지도를 구축하는 것이다. 지반 분류별로 부지 효과를 고려하기 위해 확률론적 지진재해도 해석 시 부지 증폭 모델을 적용하여 지진위험지도를 작성하였다. 그리고 한반도 지역의 내진 설계에 적용하기 위한 등재해도 응답 스펙트럼을 작성하였다.

핵심용어 : 확률론적 지진재해도 해석, 부지 증폭 모델, 추계학적 점지진원 모델, 지반운동 예측식, 등재해도 응답 스펙트럼

1. 서 론

한반도는 지진 활동도가 높지 않은 안정 대륙 지역(Stable Continental Regions, SCRs) 내부에 속해 있기 때문에 일본, 대만, 미국서부 지역과 같은 지진 활동이 활발한 지역에 비해 큰 규모를 가진 지진의 발생가능성은 높지 않다(Johnston, 1996; Schulte and Mooney, 2005). 그러나 안정 대륙 지역은 지진활동도가 높은 지역에 비해 강진 발생 가능성이 적음에도 불구하고 여전히 위협적인데, 지진파에 대해 상대적으로

낮은 비탄성 경로 감쇠와 효율적인 에너지 전달과 같은 지진학적 특성을 보유하고 있어서 큰 지진이 발생할 경우 주변 지역에 널리 퍼지며 영향을 끼치기 때문이다(Mitchell, 1995; Johnston, 1996; Stein, 2007; Calais et al., 2016). 역사적으로 한반도에서 큰 규모의 지진이 다수 발생한 바 있다(Lee and Yang, 2006; KMA, 2012; NEMA, 2012). 그리고 한반도는 기상청에서 국내 지진에 대한 디지털 계기 관측을 수행한 이후로 한반도 내륙에서 발생한 2016년 경주지진($M_L = 5.8$)과 2017년 포항지진($M_L = 5.4$)은 주변 지역에 대한 많은

*정회원, 한양대학교 건축공학과 석박사 통합과정(E-mail: duqrlxhrl72@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University

**교신저자, 한양대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-2-2220-1715, Fax: +82-2-2220-1716, E-mail: swhan@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University

인명 피해와 건축 및 문화재 구조물의 피해에 따른 경제적 손실을 유발하였다. 따라서 한반도에서 발생하는 지진 피해에 대한 정량적 평가와 구조물의 내진설계에 대한 관심이 증가하고 있다.

지진 피해를 정량화하기 위해 널리 쓰이는 방법은 대상 지역에서의 지반운동 가속도 값이 임의의 값을 초과하는 연초과율(annual rate of exceedance)을 계산하는 확률론적 지진재해도 해석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)이 있다. 일본의 Headquarters for Earthquake Research Promotion (HERP), 미국의 U.S. Geological Survey (USGS), 그리고 호주의 Geoscience Australia에서 개발한 국가 지진위험지도는 확률론적 지진재해도 해석을 활용하여 지속적으로 갱신되고 있다. 그리고 한반도의 지진위험지도는 건설교통부와 소방방재청에서 개발된 바 있다(MOCT, 1997; NEMA, 2012).

그러나 국내 지진위험지도는 최대지반운동가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)만 제안되어있다. 해외에서는 최대지반운동가속도 외에 다양한 주기를 고려하여 5% 감쇠비 적용된 유사응답스펙트럼가속도(Pseudo Spectral Acceleration, PSA) 지진위험지도를 개발하여 내진설계에 반영하고 있기 때문에 이에 대한 고려는 매우 중요하다(Kyung et al., 2016).

또한 각 주기별 스펙트럼 가속도 값은 지반 조건에 따라서 부지 증폭 효과가 적절하게 고려될 필요가 있다. 이에 대해 현재 국내에서 널리 쓰이고 있는 방법은 부지 응답 해석이다. 그러나 부지 응답 해석을 수행하기 위해서는 대상 지역에 대한 지층 깊이별 전단파 속도, 토질 종류 및 물성치에 대한 구체적인 정보가 필요하다. 또한 한반도 전역에 대하여 해석을 수행함에 있어 해석시간이 매우 비효율적인 것으로 판단하였다. 대안으로 본 연구에서는 지반 운동 예측식(Ground Motion Prediction Equations, GMPEs)에 사용되고 있는 부지 증폭 모델을 활용하였다(Sandikkaya et al., 2013; Chiou and Youngs, 2014; Seyhan and Stewart, 2014; Sandikkaya and Dinsever, 2018). 부지 증폭 모델들은 토질의 선형 및 비선형 거동을 고려하여 개발되었으며, 주로 대표 암반 지역에서의 최대지반가속도(PGA_{rock}) 또는 유사응답스펙트럼가속도(PSA_{rock})와 함께 30 m 깊이의 평균 전단파속도(V_{S30})를 입력 매개변수로 하여 주기에 따른 부지 증폭 값을 계산할 수 있다. 또한 부지 증폭 모델들의 주요 매개변수는 30 m 깊이의 평균 전단파속도 (V_{S30})이므로, 부지 효과를 고려하기 위해 대상 지역 별로 지층 별 상세한 지질학적 구조를 파악해야 하는 부지 응답 해석에 비해 활용성이 용이한 장점이 있다. 관련 기존 연구(Bazzurro and Cornell, 2004; Sandikkaya et al., 2018)에서는 이러한 부지 증폭 모델을 활용하여 부지 효과가 고려된 확률론적 지진재해도 해석을 수행하여 부지 증폭 모델 활용에 대한 타당성을 검증한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 부지 효과를 고려하기 위해 부지 증폭 모델을 활용하였다.

여기서, USGS (Worden et al., 2015)에서 제공하고 있는

지형의 기울기에 대한 환산 값을 한반도의 30 m 깊이의 평균 전단파속도 (V_{S30})로서 활용하였으며 Fig. 1에 나타내었다.

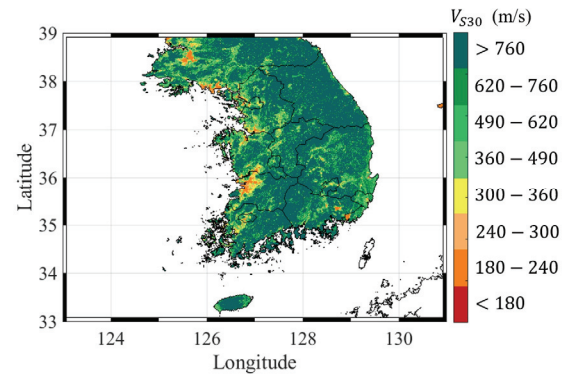


Fig. 1. The Slope Based V_{S30} Map for the Korean Peninsula from USGS (Worden et al., 2015)

본 연구의 목표는 한반도에서 발생하는 지진 피해에 대한 정량적 평가를 위해 부지 증폭 효과가 고려된 지진위험지도를 구축하는 것이다. 이를 위해서 다음 장에 제시된 절차에 따라서 국내 적합한 확률론적 지진위험도 해석을 수행하였다.

2. 부지 효과 고려한 확률론적 지진재해도 해석

2.1 확률론적 지진재해도 해석 절차

전술하였듯이 대상 지역의 지진 피해를 정량화하여 예측하기 위해 사용되는 방법 중에 하나로서 확률론적 지진재해도 해석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)이 널리 쓰이고 있다. 이 해석 방법은 Cornell (1968)이 사용한 이래로 현재까지 개선되어 내진 설계를 위한 지진위험지도 작성에 활발하게 활용되고 있다.

본 연구에서는 Baker (2015)가 소개한 절차를 활용하여 확률론적 지진재해도 해석을 수행하였으며, 이에 대한 절차는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 Step 1은 대상 지역에 피해를 줄 수 있는 가능성을 가진 모든 지진원(Earthquake source)들을 고려하는 단계이다. 이에 대해 본 연구에서는 한반도 전역에 대하여 대상 지역별로 지진 공학적으로 유효한 범위로서 반경 100 km 이내의 배경 지진원(Background source)을 고려하였다(Fig. 3). 이 때 사용된 역사지진 및 계기지진은 소방방재청(NEMA, 2012)에서 사용한 지진 목록을 활용하였다. 이 중에서 Fig. 4에는 모멘트 규모 4이상의 지진 분포를 나타내었다. Fig. 4(a)는 서기 2년부터 1904년까지의 역사 지진 목록을 지도상에 나타낸 것이고, Fig. 4(b)는 서기 1905년부터 2011년까지의 계기 지진 목록을 지도상에 나타낸 것이다. 역사 지진 목록에서는 해상에 대한 기록이 거의 나타나지 않는데, 이는 역사기록 상에서 해상에 대한 지진 관측은 거의 수행되지 않았던 것으로 고려된다.

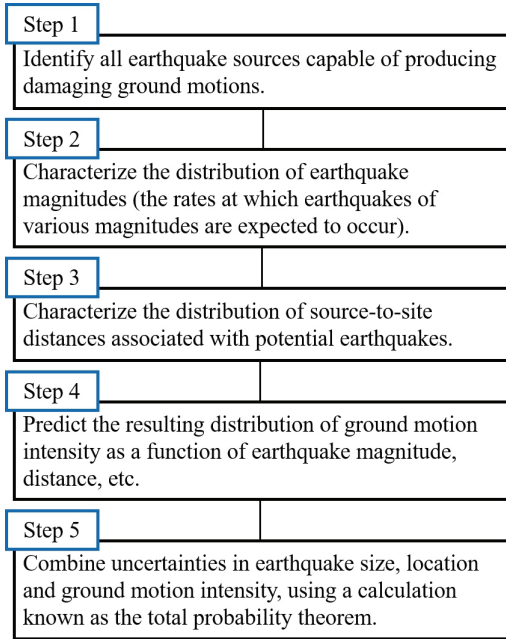


Fig. 2. The Procedure Flow Chart for Conducting Probabilistic Seismic Hazard Analysis from Baker (2015)

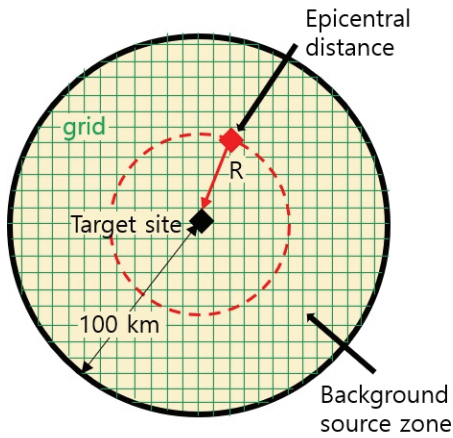


Fig. 3. The Background Source Zone Considered in this Study for Conducting Probabilistic Seismic Hazard Analysis

Fig. 2에서 Step 2는 대상 지역에서 사용된 지진원의 지진 활동도를 평가하는 단계이다. 이 단계에서 Baker (2015)는 지진 활동도를 평가하기 위해 모멘트 규모 3 이상의 지진 기록을 대상으로 Gutenberg and Richter (1944)가 제안한 Eq. (1)을 통해 임의의 모멘트 규모를 초과하는 지진 대한 연간 발생 빈도 $[\lambda_m]$ 를 추정할 수 있다.

$$\log(\lambda_m) = a + bm \quad (1)$$

여기서, m 은 모멘트 규모 값이며, a 와 b 는 평가된 상수 값이다. Eq. (1)을 누적 확률 분포 $[F_M(m)]$ 로 변환하면 아래와 같은 Eq. (2)로 나타낼 수 있다.

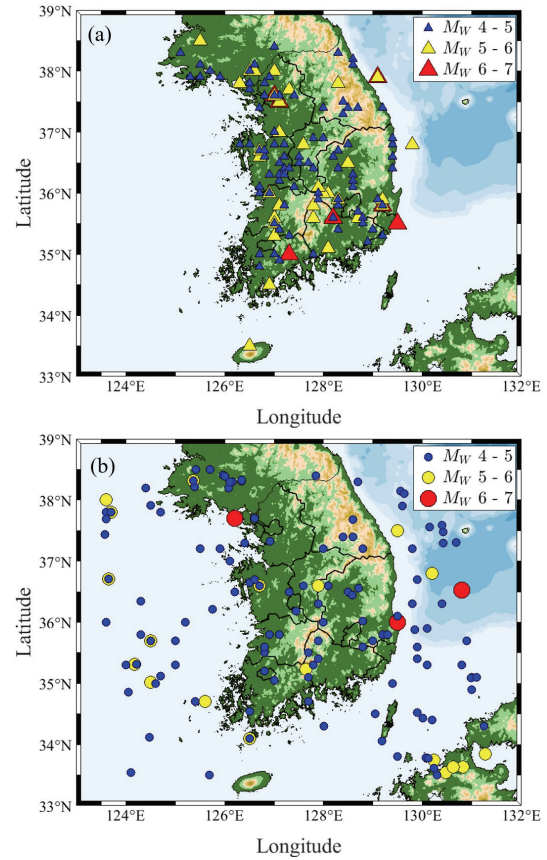


Fig. 4. The Earthquake Source Distribution for the Korean Peninsula and Nearby Regions from NEMA (2012): (a) historical earthquake catalogue (2 to 1904), (b) recorded earthquake catalogue (1905 to 2011)

$$F_M(m) = 1 - 10^{-b(m-m_{\min})} \quad (2)$$

여기서, m_{\min} 은 대상 지역에서 고려된 최소 모멘트 규모 값이다. 일반적으로 확률론적 지진 재해도 해석 수행 시, 모멘트 규모 5보다 작은 지진은 구조물에 피해를 입힐 가능성이 적다는 가정 하에 최소 모멘트 규모는 5를 주로 사용한다.

Eq. (2)을 활용하여 모멘트 규모 m 의 지진이 발생할 확률 $[P(m)]$ 을 계산할 수 있으며 Eq. (3)으로 나타낼 수 있다.

$$P(m = m_j) = F_M(m_{j+1}) - F_M(m_j) \quad (3)$$

여기서, 확률은 연속 확률이 아닌 이산 확률로서 계산에 활용되므로 j 번째 모멘트 규모인 m_j 에 대한 확률로서 $P(m = m_j)$ 를 나타내었다. 이 단계에서 기본적으로 고려해야 할 값은 대상 지역별 최소 지진 규모의 연간 발생 빈도 ($\lambda_{m_{\min}}$)와 b 값이다.

소방방재청(NEMA, 2012)은 지진 목록의 완전성을 고려하기 위해 대안으로 시대별 가중치 (Table 1)를 여러 조합으로 제시한 바 있으며, 본 연구에서는 이를 활용하여 최소 지진 규모의 연간 발생 빈도 ($\lambda_{m_{\min}}$)와 b 값을 계산하였다.

Fig. 5는 Table 1의 가중치 조합 1을 활용하여 대상 지역별 최소 지진 규모의 연간 발생 빈도($\lambda_{m_{min}}$)와 b 값을 한반도 전역에 대해 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 간격 격자별로 구축하여 지도상에 나타낸 것이다. 이 때, 계산된 값은 격자 별로 다소 불연속성이 두드러지는데 이러한 지진학적 특성은 공간적으로 연속되어야 하는 가정 하에 관련 기존 연구(Frankel et al., 1996; Han and Choi, 2008)에서 제안한 바와 같이 평활화 작업을 수행하여 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 Table 1에 나타난

다른 가중치 조합 고려하여 확률 재해도 해석 수행 시 반영하였다. Fig. 2에서 Step 3은 대상 지역에서 주변에서 발생할 가능성이 있는 지진원과 대상 지역 간 거리(Source-to-site distance)의 분포를 평가하는 단계이다. 본 연구에서는 지진 공학적으로 유효한 거리인 반경 100 km 이내의 영역을 배경 지진원으로 사용하고 있다. 따라서 Eq. (4)에 나타낸 바와 같이 진앙 거리에 따른 누적 확률 분포[$F_R(r)$]를 구할 수 있다.

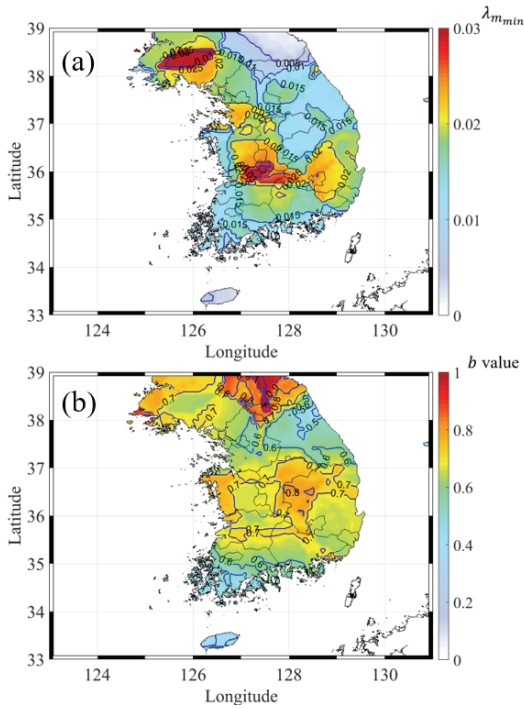


Fig. 5. Example of Unsmoothed Annual Rate of Minimum Moment Magnitude Exceedance ($\lambda_{m_{min}}$) and b Value Maps for Weight Combination 1 Referred to Table 1: (a) Annual rate of minimum moment magnitude exceedance ($\lambda_{m_{min}}$), (b) b value

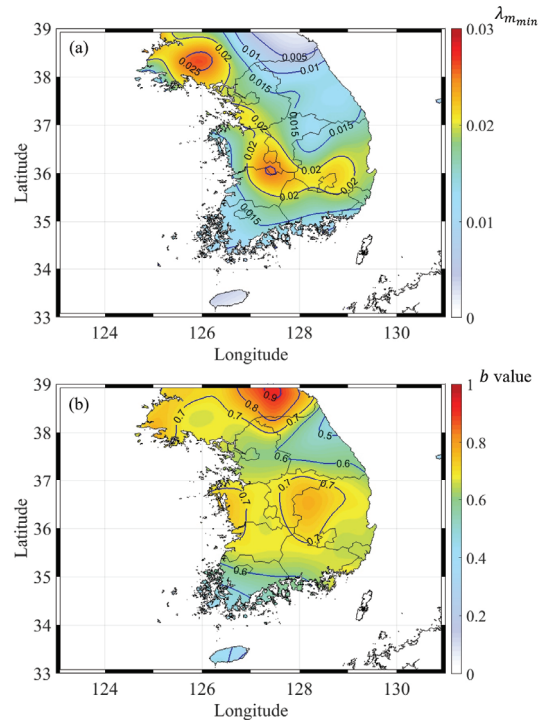


Fig. 6. Example of Smoothed Annual Rate of Minimum Moment Magnitude Exceedance ($\lambda_{m_{min}}$) and b Value Maps for Weight Combination 1 Referred to Table 1: (a) Annual rate of minimum moment magnitude exceedance ($\lambda_{m_{min}}$), (b) b value

Table 1. Weight Combination for Historical and Recorded Earthquake from NEMA (2012)

Weight combination	Earthquake catalogue					
	History				Record	Other
	Three Kingdoms	Goryeo	Joseon	Total		
1	0.05	0.05	0.3		0.6	
2					1.0	
3				0.8	0.2	
4			0.5		0.5	
5	0.1	0.1	0.2		0.6	
6					0.4	Joseon + Record (0.6)
7					0.8	After 1000 year (0.2)
8	0.1	0.1	0.3		0.5	
9	0.05	0.05	0.3		0.6	
10				0.5	0.5	

$$F_R(r) = \begin{cases} 0 & (r < 0 \text{ km}) \\ \frac{r^2}{10,000} & (0 \text{ km} \leq r < 100 \text{ km}) \\ 1 & (r \geq 100 \text{ km}) \end{cases} \quad (4)$$

여기서 r 은 진앙 거리이다.

Eq. (4)를 활용하여 진앙 거리 r 의 지진이 발생할 확률 $[P(r)]$ 을 계산할 수 있으며 Eq. (5)로 나타낼 수 있다.

$$P(r=r_j) = F_R(r_{j+1}) - F_R(r_j) \quad (5)$$

마찬가지로 확률은 연속 확률이 아닌 이산 확률로서 계산에 활용되므로 j 번째 진앙 거리 r_j 에 대한 확률로서 $P(r=r_j)$ 를 나타내었다.

Fig. 2에서 Step 4는 모멘트 규모, 진원 거리, 부지 효과 등의 여러 매개변수에 따른 지반 여건에 적합한 지반운동 예측식(Ground Motion Prediction Equations, GMPEs)을 결정하여야 한다.

본 연구에서는 기존 국내 지반운동 예측식 연구(Noh and Lee, 1995; Jo and Baag, 2001, 2003; Junn et al., 2002)만을 활용하였다. 해외 지역의 지반운동 예측식은 최대지반가속도와 유사응답스펙트럼가속도 모두를 고려하였을 때 편차가 클 것으로 판단하여 제외하였다. 편차가 큰 입력변수 집단을 사용할 경우에 지진위험지도 작성 시 불확실성을 증가시킬 수 있는 위험성이 있다(Rhee et al., 2011). 국내 지반운동 예측식 연구는 한반도를 대상으로 추계학적 점진원 모델(Stochastic point-source model)을 활용하여 감쇠식을 제안한 바 있다. 이 때, 각 연구에서 제안된 감쇠식의 주기는 일관되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 기존 연구에서 제안한 추계학적 점진원 모델과 매개 변수를 활용하여 지진 시나리오별로 지반 운동 가속도를 생성하여 계산한 최대지반가속도와 주기별 5% 감쇠비 적용된 유사응답스펙트럼가속도를 사용하였다.

추계학적 점진원 모델은 Brune (1970, 1971)에서 사용된 ω^2 모델을 기본으로 한 푸리에 진폭 스펙트럼(Fourier Amplitude Spectrum, FAS) 모델로서 Hanks and McGuire (1981)와 Boore (1983)가 지반 운동의 특성을 분석하고 모사하기 위해 사용한 이래로 현재까지 널리 쓰이고 있다. 본 연구에서 사용한 수식은 아래의 Eq. (6)과 Table 2에 나타내었다.

$$A(M_o, \gamma, f) = \frac{\langle R_{\theta\phi} \rangle \times F \times V}{4\pi\rho\beta^3} \times \frac{(2\pi f)^2 M_o}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \times \frac{e^{-\pi\kappa f}}{\gamma} \quad (6)$$

여기서, $\langle R_{\theta\phi} \rangle$ 는 적절한 방위각(azimuth angle)과 출사각(take-off angle)에 대해 평균한 지진파의 방사 패턴 계수 값이다. F 는 자유면 효과를 고려한 계수이다. V 는 수평방향의 에너지를 동일하게 벡터 분할하기 위한 계수이다. ρ 와

β 는 지진원 근처 지각의 밀도와 전단파 속도이다. M_o 는 지진 모멘트이다. f 는 주파수이다. f_c 는 추계학적 점진원 모델에서 급격하게 기울기가 변화하는 위치인 모서리 주파수이다. κ 는 경로에 따른 감쇠를 나타내는 감쇠 계수이다. γ 은 경로에 따른 기하학적 확산을 의미하며, 진원 거리 R_{Hypo} 에 의해서 정의하였다. 이때 진원 거리가 100 km보다 가까운 경우 R_{Hypo} 를, 100 km보다 먼 거리의 경우 표면파의 영향에 의해 $10R_{Hypo}^{0.5}$ 를 사용하였다. 지진 모멘트 M_o 은 Hanks and Kanamori (1979)가 제안한 관계식 Eq. (7)을 통해 계산할 수 있다.

$$M_W = \frac{2}{3} \log M_o - 10.7 \quad (7)$$

여기서 M_W 은 모멘트 규모이다.

모서리 주파수 f_c 는 Boore (1983)가 제안한 관계식 Eq. (8)을 통해 계산될 수 있다.

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta \left(\frac{\Delta\sigma}{M_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

여기서 $\Delta\sigma$ 는 지진 전후 지진원에서의 응력 강하 값이다. 지반운동 가속도 값은 Boore (2003)가 앞에서 설명한 추계학적 점진원 모델과 형태창 모델이 적용된 백색 잡음을 활용하여 모사하였다. 여기서 Saragoni and Hart (1974)에 의해 제시된 형태창을 적용하였다. 그리고 지반운동의 지속 시간 $[T_D]$ 은 Boore and Atkinson (1987)이 제안한 Eq. (9)를 사용하였다.

$$T_D = \frac{1}{f_c} + 0.05 R_{Hypo} \quad (9)$$

본 연구에서는 직접 지반운동 예측식을 사용하지 않는 대신 최대지반가속도 5% 감쇠비 적용된 유사응답스펙트럼가속도를 지진 시나리오 (진원 거리 및 모멘트 규모) 별로 수치 해석프로그램에서 발생한 불필요한 분산을 제거하기 위해 다수 생성한 값의 중앙값을 계산하여 사용하였다. 예시로서 생성된 최대지반가속도 값은 부지효과가 제거된 2017년 포항 지진과 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 기존 국내 감쇠식 연구를 활용하여 생성된 최대지반 가속도 값은 동일한 한반도를 대상으로 연구가 진행되었기 때문에 지진 거리에 따른 감쇠 특성이 어느 정도 유사함을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 진폭(크기)에서 다소 차이가 존재한다. 이와 관련된 기존 연구(Atkinson, 2008; Atkinson and Boore, 2014; Yenier and Atkinson, 2015)에서는 지반 여건에 맞게 지반운동 예측식을 수정하는 방법을 제안한 바 있다.

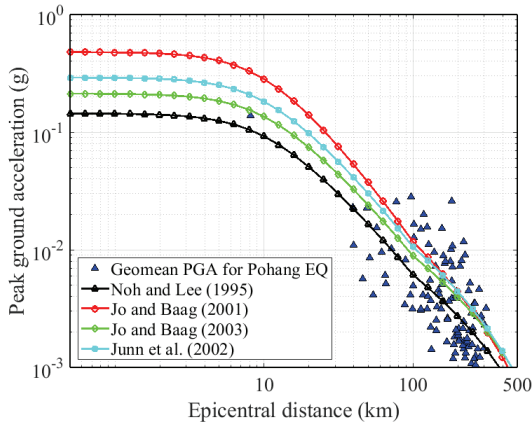


Fig. 7. Example of PGA of Ground Motion Prediction and 2017 Pohang Earthquake

Yenier and Atkinson (2015)는 로그 영역에서 관측값과 예측식의 잔차들(residuals)을 계산하여, 지진 이벤트 별로 평균하여 최대지반가속도와 5% 감쇠비 적용된 응답스펙트럼가속도에 대한 수정 값(calibration factor)를 계산한 바 있다. 따라서 본 연구에서도 이와 비슷하게 기존 연구에서 생성된 지반운동의 최대지반가속도와 5% 감쇠비 적용된 응답스펙트럼가속도를 수정하여 사용하였다. 여기서 사용된 지진 관측 값은 디지털 계기 관측 이후, 한반도 내륙에서 가장 피해를 유발한 2016년 경주 지진 본진과 2017년 포항 지진 본진에 의한 지반운동 가속도 기록을 한반도의 지진 특성을 대표하는 것으로 가정하여 사용하였다(Table 3). 사용된 지반운동 가속도의 지진 이벤트와 관측소 분포는 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 9는 본 연구에서 최대지반가속도와 5% 감쇠비 적용된 주기별 유사응답스펙트럼가속도에 대한

수정 계수와 표준편차를 평가하여 나타낸 것이다. Fig. 10은 예시로서 Fig. 7에서 계산된 기존 연구들의 PGA 값들을 수정한 것을 나타낸 것이다.

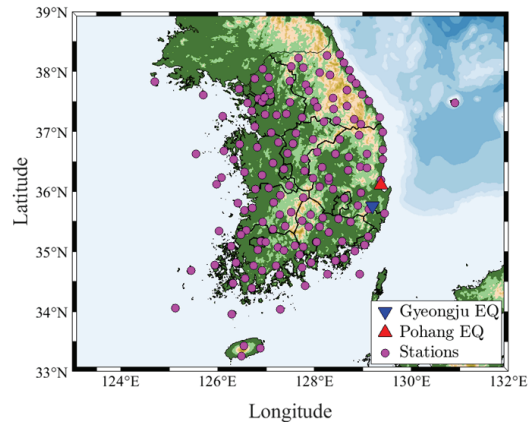


Fig. 8. The 2016 Gyeongju Earthquake and 2017 Pohang Earthquake Epicenter and Recording Stations Used in this Study

본 연구에서는 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진의 지반운동 관측기록에 대하여 수정된 값들은 한반도의 지반 여건을 적절하게 반영할 수 있다고 판단하여 이를 지진재해도 해석에 사용하였다.

Fig. 2에서 Step 5는 마지막 절차로서 선행 절차에서 수행한 결과를 통합하여 대상 지역에서의 지반운동 가속도에 의한 최대지반가속도 또는 유사응답스펙트럼가속도 값 (IM)이 임의의 값 (x)을 초과하는 연초과율(annual rate of exceedance) [$\lambda(IM > x)$]을 계산하는 단계이다. 이에 대한 식은 Eq. (10)에 나타내었다.

Table 2. Stochastic Point-source Model's Parameters for Previous Researches in the Korean Peninsula

Earthquake parameters	Parameter values			
	Noh and Lee (1995)	Jo and Baag (2001)	Junn et al. (2002)	Jo and Baag (2003)
$\langle R_{0\phi} \rangle$	0.63	0.63	0.63	0.63
F	2.0	2.0	2.0	2.0
V	0.7071	0.7071	0.7071	0.7071
ρ	2.7 g/cm ³	2.7 g/cm ³	2.7 g/cm ³	2.7 g/cm ³
β	3.5 km/s	3.5 km/s	3.5 km/s	3.5 km/s
$\Delta\sigma$	50 bar	100 bar	65 bar	92 bar
κ	0.01397 +0.0001634R	0.00112 +0.000224R	0.00516 +0.000147R	0.016 +0.000157R

Table 3. Information of the Earthquake Events Catalogue from National Earthquake Comprehensive Information System (NECIS)

Earthquake event	Local-date Time	Longitude (East)	Latitude (North)	Focal Depth (km)	M_L	M_W (USGS)
The 2016 Gyeongju EQ	2016-09-12 20:32:54	129.19	35.76	19	5.4	5.4
The 2017 Pohang EQ	2017-11-15 14:29:31	129.37	36.11	9	5.8	5.5

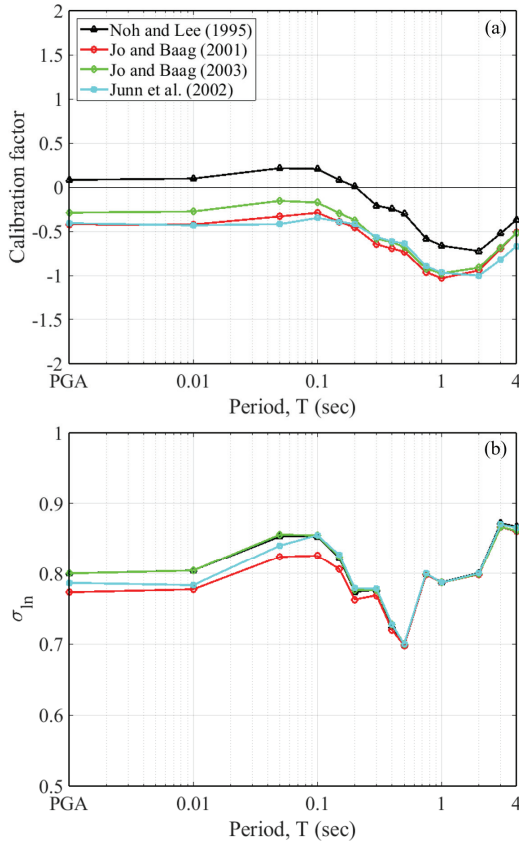


Fig. 9. Calibration Factor and Total Standard Deviation for Each Ground Motion Prediction of Previous Research for the 2016 Gyeongju Earthquake and 2017 Pohang Earthquake

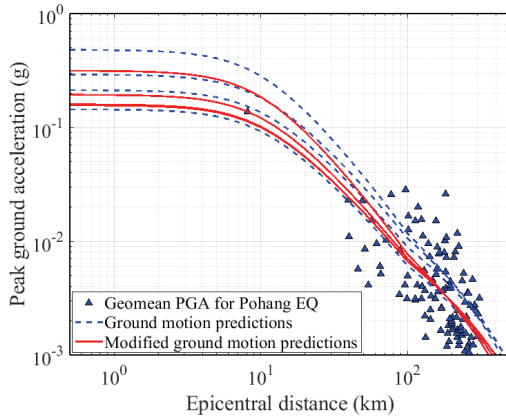


Fig. 10. Example of PGA of Modified Ground Motion Prediction and 2017 Pohang Earthquake

$$\lambda(IM > x) = \lambda(M > m_{\min}) \times \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P(IM > x | m_j, r_k) P(M = m_j) P(R = r_k) \quad (10)$$

여기서, $\lambda(M > m_{\min})$ 은 대상 지역별 최소 모멘트 규모 5에 대한 연초과율을 의미하며 Fig. 2의 Step 2에서 계산할 수 있다. $P(M = m_j)$ 는 이산 확률 분포를 고려하였을 때,

대상 지역별로 모멘트 규모 m_j 가 발생할 확률을 의미하여 Fig. 2의 Step 2에서 계산할 수 있다. $P(R = r_k)$ 는 이산 확률 분포를 고려하였을 때, 대상 지역별로 진앙 거리 r_k 가 발생할 확률을 의미하여 Fig. 2의 Step 3에서 계산할 수 있다. $P(IM > x | m_j, r_k)$ 는 대상 지역별로 모멘트 규모가 m_j , 진앙 거리가 r_k 일 때, 최대지반가속도 또는 유사응답스펙트럼가속도 값 (IM)이 임의의 값 (x)을 초과할 확률을 의미하며 Fig. 2에서 Step 4 단계와 Eq. (11)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$P(IM > x | m_j, r_k) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln x - \overline{\ln IM}}{\sigma_{\ln}}\right) \quad (11)$$

여기서, $\Phi(\cdot)$ 는 표준 정규 누적 분포 함수 (standard normal cumulative distribution function)를 의미한다. $\overline{\ln IM}$ 은 지진 시나리오별로 계산된 최대지반가속도 또는 5% 감쇠비 적용된 유사응답스펙트럼가속도를 자연로그 영역에서 평균값을 의미하며, 이는 Fig. 2의 Step 4에서 계산되었다. σ_{\ln} 는 생성된 인공 지반운동과 실제 관측된 지반운동 사이의 잔차들 (residuals)을 최대지반가속도 또는 5% 감쇠비 적용된 유사응답스펙트럼가속도에 대해 자연로그 영역에서 평균한 표준편차 값으로서 Fig. 2의 Step 4에서 계산되었다. Fig. 11에는 예시로서 Table 1의 가중치 조합 1과 수정된 Noh and Lee (1995) 감쇠식에 대하여 임의의 지역 (위도: 36.1° , 경도: 129.4°)에서 생성한 재해도 곡선 (Hazard curve)과 PGA 지진위험지도를 계산하여 작성하였다. 본 연구에서는 Fig. 12에 나타낸 논리수목에 따라서 한반도 전역에 지진재해도 해석을 수행하였다. 이 단계에서는 부지 효과 모델을 고려하지 않았으며, 진원 깊이는 10 km, 최소 모멘트 규모는 5, 최고 모멘트 규모는 6.5로 가정하였다. 지진재해도 해석 시 진원 깊이를 10 km로 가정한 이유는 한반도는 천발 지진이 대부분이며, 진원 깊이 분포의 대부분이 10 km를 중심으로 분포하였기 때문이다(Kim et al., 2017). 역사적으로 규모 6-7 이상의 지진이 다수 발생한 기록이 있다(Chiu and Kim, 2004). 그러나 최대 지진 규모를 6.5로 가정한 이유는 다음과 같다. 1963년 동해상에서 발생한 지진 규모 6.3이 확인된 천발지진 중에서 가장 큰 지진이었기 때문이다(NEMA, 2012). Fig. 13은 임의의 지역 (위도: 36.1° , 경도: 129.4°)에 대하여 부지 증폭 효과를 제외하고 재해도 곡선과 지진위험지도를 논리 수목을 고려하여 나타낸 것이다. Fig. 13(c)에 나타난 지진위험지도의 경우 현행 기준에서 사용하고 있는 재현주기 2400년에 대한 국가지진위험지도와 비교하였을 때 전반적으로 약간 큰 값을 보이지만 비슷한 양상을 보이고 있기 때문에 본 연구에서 수행한 지진재해도 해석은 적합하다고 판단하였다. 여기서 결과에 대해 차이가 발생하는 이유는 지진원의 정의, 단층의 영향에 대한 고려 유무, 사용된 지반운동 예측식 집단의 차이, 논리 수목의 구성

등 여러 요인이 있을 수 있다. 그러므로 이러한 결과에 대한 불확실성을 줄이기 위해서는 재해도 해석을 수행하는 데 있어서 공통된 요인과 절차에 대한 합의가 필요할 것으로 고려된다.

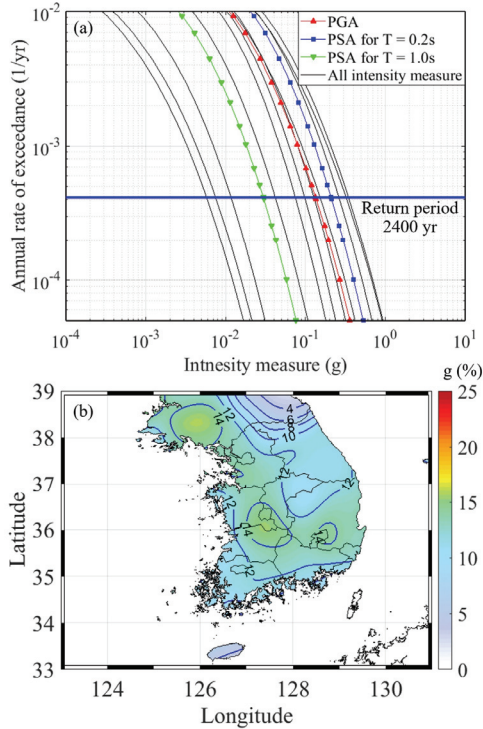


Fig. 11. Example of Hazard Curves and Seismic Hazard Map for Weight Combination 1 and Noh and Lee (1995): (a) hazard curve, (b) PGA seismic hazard map or return period 2400 year

2.2 부지 효과 모델 반영

신뢰성 있는 내진 설계를 수행하기 위해서는 각 대상 지역 및 주기별로 지진재해수준을 적절하게 판단할 필요가 있다. 2.1절에서는 부지 효과를 고려하지 않은 암반 지역에 대하여 지진재해도 해석이 수행되었고 결과는 적합한 것으로 고려되었다. 이번 절은 대상 지역에 대한 지반 조건에 따른 부지 증폭의 영향을 고려하여 최대지반 가속도와 각 주기별 5% 감쇠비 적용된 유사응답스펙트럼 가속도에 대해 지진재해도 해석을 수행하여 지진위험지도를 작성하였다.

앞서 언급하였듯이 지진재해도 해석에서 부지 증폭은 부지 응답 해석 이외에 지반운동 예측식에 활용되는 부지 증폭 모델을 활용하여 재해도 해석을 수행할 수 있다(Bazzurro and Cornell, 2004; Sandikkaya et al., 2018). 본 연구에서는 관련 기존 연구(Sandikkaya et al., 2013; Chiou and Youngs, 2014; Seyhan and Stewart, 2014; Sandikkaya and Dinsever, 2018)에서 제안된 부지 증폭 모델을 활용하였다. 한반도는 기반암 심도가 미국 서부 지역에 비하여 상대적으로 매우 얇기 때문에, 본 연구에서는 이와 관련된 효과 (deep soil effect)는 없는 것으로 가정하였다(Sun, 2015). 본 연구에서 사용된 부지 증폭 모델은 암반 지역에서의 최대지반가속도 (PGA_{rock}) 또는 5% 감쇠비 적용된 유사응답스펙트럼가속도 (PSA_{rock})와 함께 30 m 깊이의 평균 전단파속도 (V_{S30})를 입력 매개변수로 하여 계산된다. 여기서 부지 효과 모델은 기준이 되는 암반 지역에 대한 30 m 깊이의 평균 전단파속도 (V_{ref})에 의해 정규화 [$f_{mod,site}(M, V_{S30})$]가 가능하며, Eq. (12)를 사용하여 계산할 수 있다(Stewart et al., 2015).

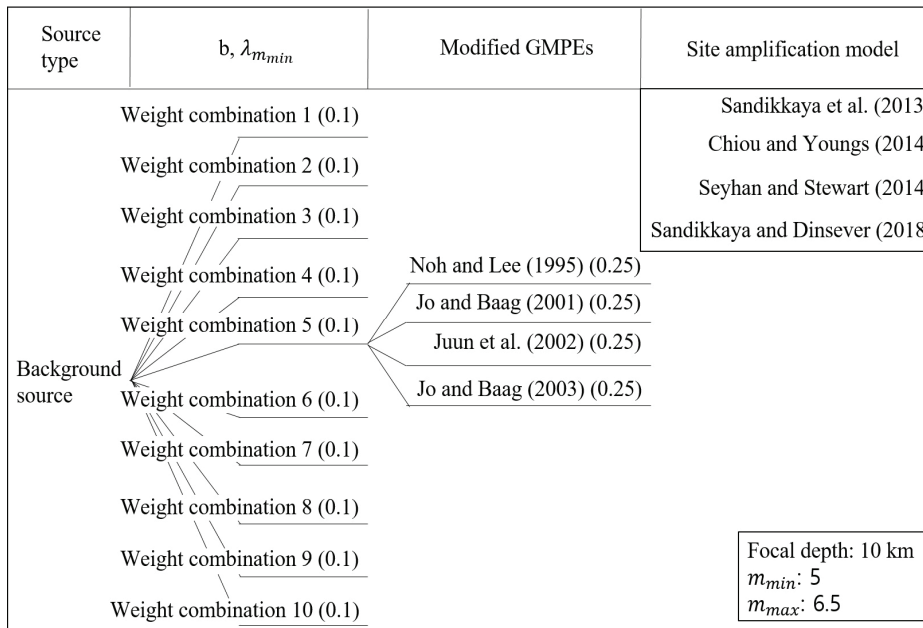


Fig. 12. Logic Tree Used in this Study for Conducting Probabilistic Seismic Hazard Analysis

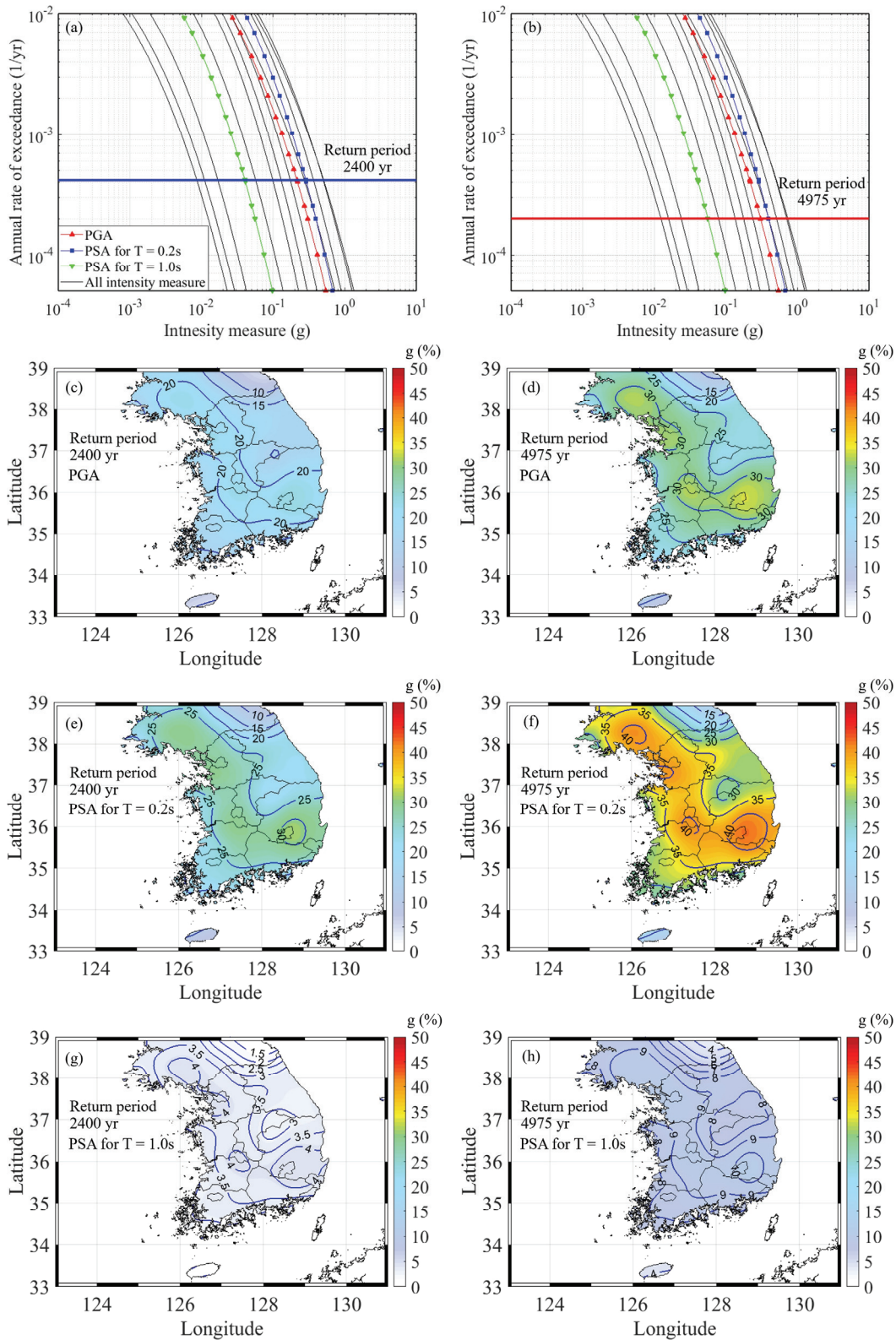


Fig. 13. Hazard Curves and Seismic Hazard Map for the Korean Peninsula: (a) Hazard curve with return period 2400 year, (b) Hazard curve with return period 4975 year, (c) PGA seismic hazard map of return period 2400 year, (d) PGA seismic hazard map of return period 4975 year, (e) PSA for $T = 0.2s$ seismic hazard map of return period 2400 year (f) PSA for $T = 0.2s$ seismic hazard map of return period 4975 year, (g) PSA for $T = 1.0s$ seismic hazard map of return period 2400 year, (h) PSA for $T = 1.0s$ seismic hazard map of return period 4975 year

$$f_{\text{mod.site}}(I_{M_r}, V_{S30}) = f_{\text{site}}(I_{M_r}, V_{S30}) - f_{\text{site}}(I_{M_r}, V_{ref}) \quad (12)$$

여기서 $f_{\text{site}}(I_{M_r}, V_{S30})$ 는 한반도 지역에서의 최대지반가속도 또는 유사응답스펙트럼가속도 값 (I_{M_r})과 V_{S30} 를 매개변수로 한 자연로그 영역에서의 지반 증폭 모델 함수이다. $f_{\text{site}}(I_{M_r}, V_{ref})$ 는 V_{ref} 와 I_{M_r} 을 매개변수로 한 자연로그 영역에서의 지반 증폭 모델 함수이다. 본 연구에서는 한반도에 대한 기준 V_{ref} 를 구하기 위하여, USGS에서 제공되는 V_{S30} 지도를 활용하였다(Fig. 1). 이 지도는 0.0083° 간격의 격자 값으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 위도 39° 에 비해 저위도 한반도 영역에 대한 유효한 V_{S30} 값을 정리하였으며 이를 Fig. 14에 나타내었다.

본 연구에서는 지반 분류에 따른 부지 효과를 고려하기 위하여, 이에 대응하는 V_{S30} 을 계산하고자 하였으며 KBC-2016

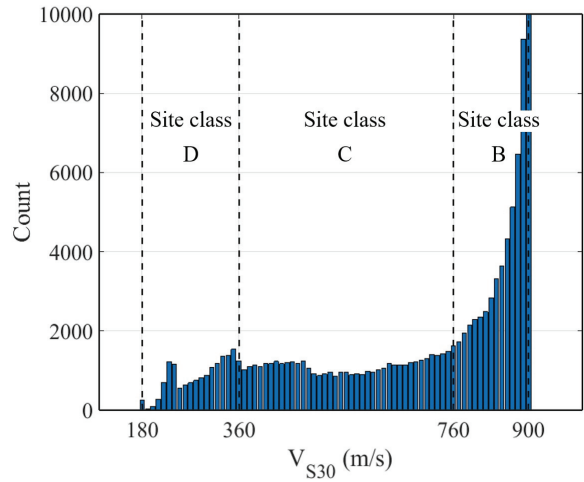


Fig. 14. Count Values of V_{S30} for the Korean Peninsula Regions from Fig. 1

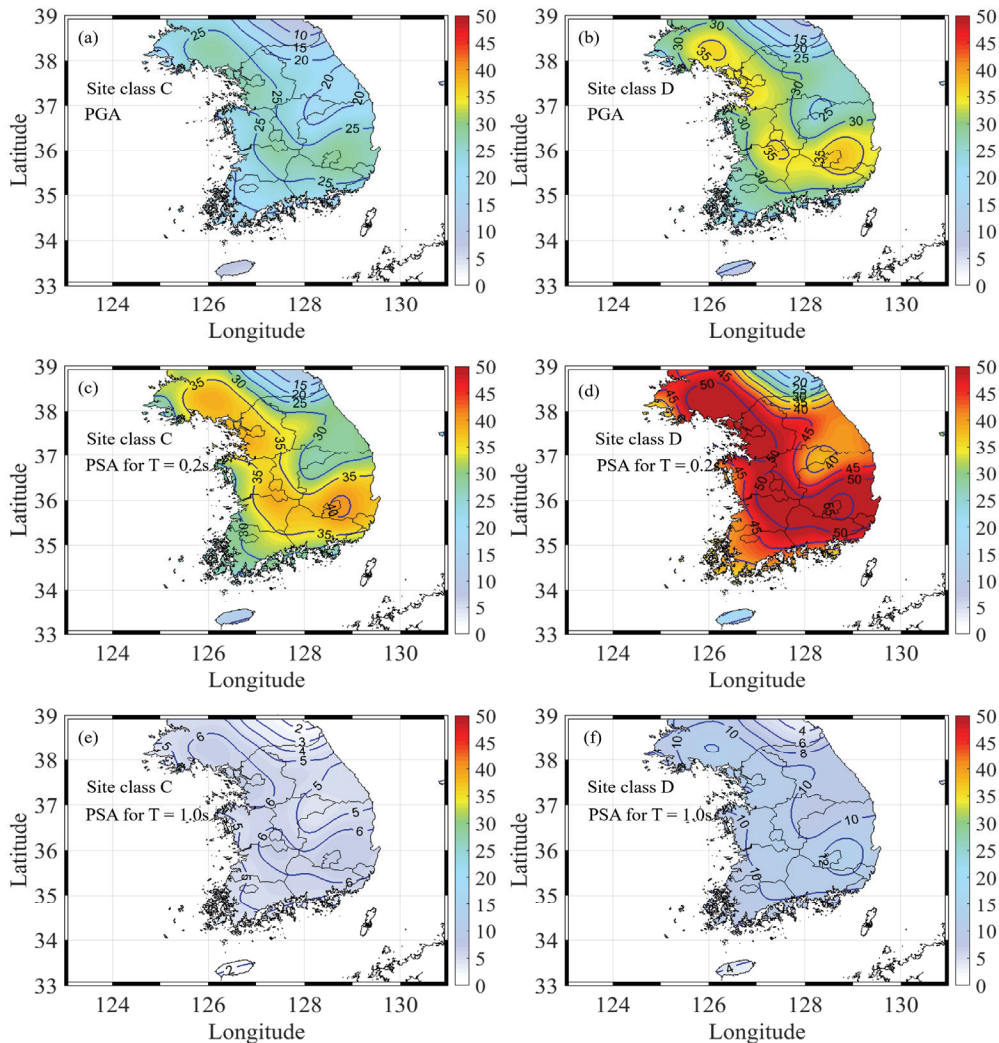


Fig. 15. Seismic Hazard Map with Return Period 2400 Year for the Korean Peninsula: (a) PGA seismic hazard map for site class C, (b) PGA seismic hazard map for site class D, (c) PSA for $T = 0.2s$ seismic hazard map for site class C (d) PSA for $T = 0.2s$ seismic hazard map for site class D, (e) PSA for $T = 1.0s$ seismic hazard map for site class C, (f) PSA for $T = 1.0s$ seismic hazard map for site class D

의 지반 분류표에 따라서 전단파 속도가 760에서 1,500사이는 지반 분류 B, 360에서 760사이는 지반 분류 C, 180에서 360사이는 D로 고려하였다. Fig. 14에 나타난 바와 같이 한반도에 대해 제시된 V_{S30} 은 180 m/s에서 900 m/s사이 값만 주어졌기 때문에 지반 분류 B, C, D 3가지의 경우에 대한 대표로서 개별 평균값 $V_{S30,B}=879.66$ m/s, $V_{S30,C}=567.06$ m/s, $V_{S30,D}=292.07$ m/s를 사용하였다. 이 때, 지반 분류 B (=지반 증폭 계수 1)에 대하여 내진 설계 시 유효한 주기에서 증폭이 없는 것으로 가정하여 $V_{ref} = V_{S30,B}$ 로서 고려하였다. 부지 증폭에 대한 편차는 지진 시나리오 별로 부지 증폭 모델 간의 자연로그 표준편차 $[\sigma_{\ln,site}]$ 를 계산하여 반영 $[\sigma_{Total}]$ 하였으며 Bazzurro and Cornell (2004)가 제안한 Eq. (13)을 활용하였다.

$$\sigma_{Total} = \sqrt{\sigma_{\ln}^2 + \sigma_{\ln,site}^2} \quad (13)$$

따라서 앞서 계산한 지진위험지도를 지반 분류 B로 고려하여 지반 분류 C와 지반 분류 D에 대한 지진위험지도를 추가로 작성하였으며 Eq. (11)에서 암반 지역에 대해 사용된

$\overline{\ln IM}$ 값은 Eq. (14)에서 부지 효과를 반영 $[\overline{\ln IM}_{site}]$ 하여 지진재해도 해석을 수행하였다.

$$\overline{\ln IM}_{site} = \overline{\ln IM} + \overline{f_{mod,site}(IM_r, V_{S30})} \quad (14)$$

여기서 $\overline{f_{mod,site}(IM_r, V_{S30})}$ 는 연구에서 사용한 부지 증폭 모델들을 자연로그 영역에서 평균한 것이다. Fig. 15는 재현 주기 2400년에 대해 지반 분류 C와 D를 고려하여 지진위험 지도를 나타낸 것이다. Fig. 15에서 나타난 바와 같이 지반 분류 B (Fig. 13)에 비해 지반 분류 C와 D의 지진위험지도가 많이 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이를 임의의 지역 (위도: 36.1°, 경도: 129.4°)에 대하여 구체적으로 나타내기 위하여 개별 지반 분류와 주기를 모두 고려한 등재해도 응답 스펙트럼(Uniform Hazard Response Spectra, UHRS)을 Fig. 16에 나타내어 비교하였다. Fig. 16(d)에서 나타난 바와 같이 등재해도 응답 스펙트럼 값은 지반 분류에 따라서 증폭됨을 확인할 수 있었다.

마지막으로 부지 증폭에 대한 비선형성을 확인하기 위해

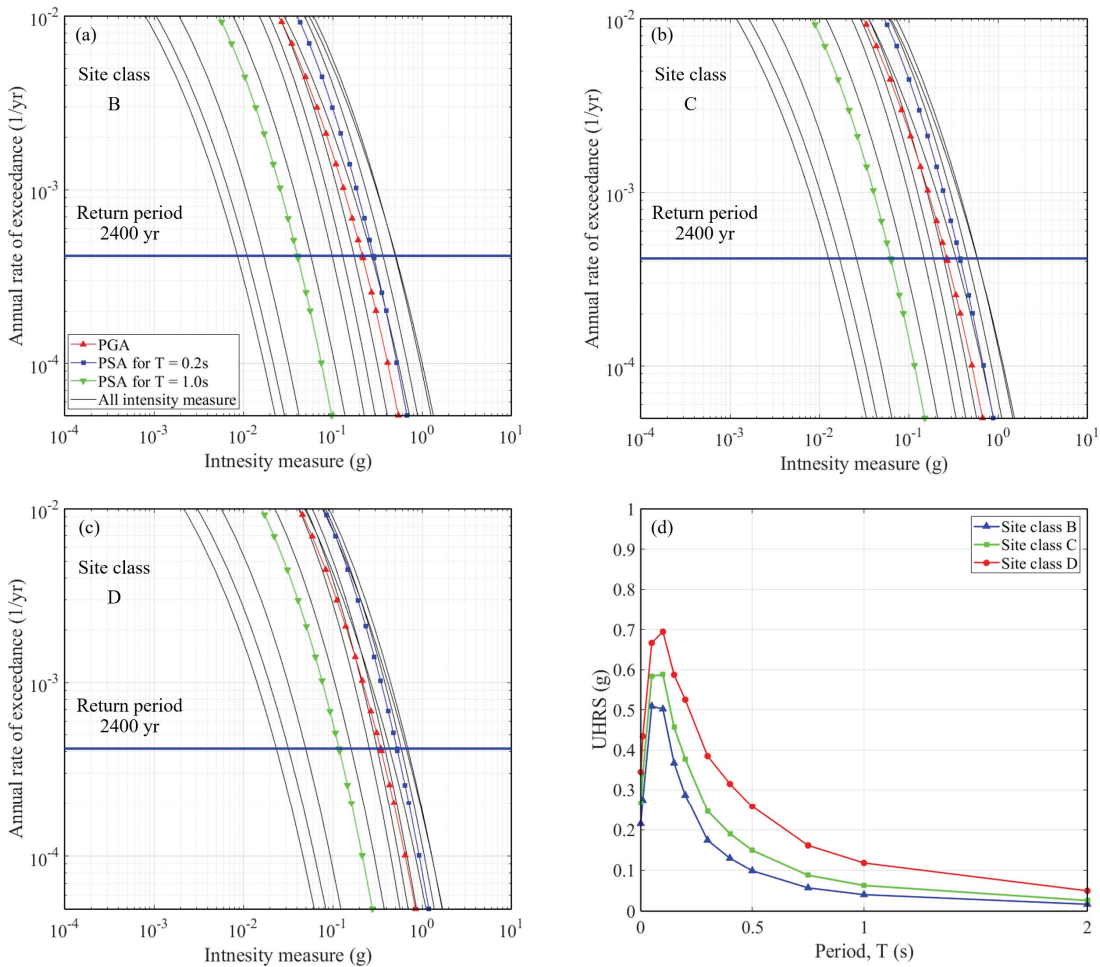


Fig. 16. Hazard Curves and UHRS with Return Period 2400 Year for the Korean Peninsula: (a) Hazard curve for site class B, (b) Hazard curve for site class C, (c) Hazard curve for site class D, (d) UHRS for each site class B, C, and D

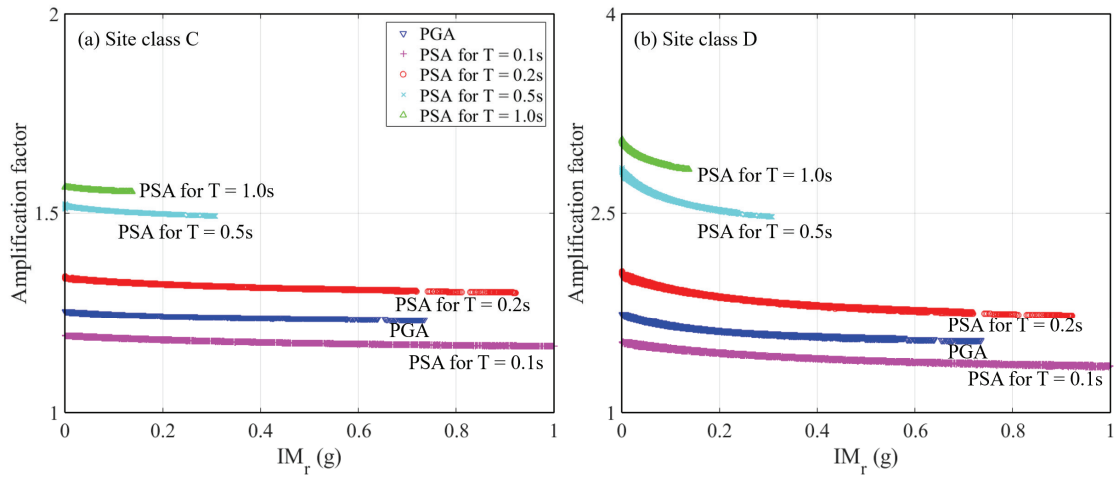


Fig. 17. Site Amplification Factor Relative to Site Class B for PGA, T = 0.1s, 0.2s, 0.5s, 1.0s: (a) Site class C (b) Site class D

지진재해도 해석에서 계산된 값을 활용하여 암반 지역에서의 최대지반가속도 또는 유사응답스펙트럼가속도 값(IM_r)에 대한 각 지반 분류별 부지 증폭 값을 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17(a)에서 나타낸 바와 같이 지반 조건 C의 경우에는 비선형성이 존재는 하지만 크게 두드러지지 않는 반면, Fig. 17(b)의 지반 조건 D의 경우 눈에 띄는 비선형성을 보임을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 한반도의 지진 피해를 정량적으로 평가하기 위해 국내 지진 정보와 지반운동 예측식, 그리고 부지 증폭 모델을 활용하여 부지 효과 반영된 지진 재해도 해석을 수행하였으며 이에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 한반도 남부에 대하여 지진재해도 해석을 수행하였으며 해석 결과는 적합한 것으로 판단하였다.
- (2) 추가로 대상 지역별로 부지 효과를 반영하기 위해 부지 증폭 모델 집단을 활용하여 부지 효과 반영된 지진위험지도를 지반 분류별(Site class B, C, and D)로 작성하였다.
- (3) 본 연구에서 지진위험지도는 최대지반가속도 뿐만 아니라 건축 또는 문화재 구조물의 고유 주기에 대응하는 유사응답스펙트럼 가속도를 포함하고 있다. 따라서 대상 지역별로 지반 분류에 따른 등재해도 스펙트럼을 작성할 수 있다.
- (4) 지진위험지도와 등재해도 스펙트럼은 한반도 남부 전역에 적용이 가능하며, 이는 내진설계(Seismic design)와 손실평가(Loss estimation)와 같은 지진 공학 연구에 유용한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

References

Atkinson, G.M., and Boore, D.M. (2014). The attenuation of Fourier amplitudes for rock sites in eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 1, pp. 513-528.

Atkinson, G.M. (2008). Ground-motion prediction equations for eastern North America from a referenced empirical approach: Implications for epistemic uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 3, pp. 1304-1318.

Baker, J.W. (2015). *Introduction to probabilistic seismic hazard analysis*. White Paper Version 2.1, Retrieved from [https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker_\(2015\)_Intro_to_PSHA.pdf](https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker_(2015)_Intro_to_PSHA.pdf)

Bazzurro, P., and Cornell, C.A. (2004). Nonlinear soil-site effects in probabilistic seismic-hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 6, pp. 2110-2123.

Boore, D.M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 6A, pp. 1865-1894.

Boore, D.M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 160, pp. 635-676.

Boore, D.M., and Atkinson, G.M. (1987). Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 2, pp. 440-467.

- Brune, J. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, No. 26, pp. 4997-5009.
- Brune J. (1971). Correction: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76, No. 20, p. 5002.
- Calais, E., Camelbeeck, T., Stein, S., Liu, M., and Craig, T.J. (2016). A new paradigm for large earthquakes in stable continental plate interiors. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, No. 20, pp. 10621-10637.
- Chiou, B.S., and Youngs, R.R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, Vol. 30, No. 3, pp. 1117-1153.
- Chiu, J.M., and Kim, S.G. (2004). Estimation of regional seismic hazard in the Korean Peninsula using historical earthquake data between A.D. 2 and 1995. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 1, pp. 269-284.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606.
- Frankel, A., Mueller, C., Barnhard, T., Perkins, D., Leyendecker, E.V., Dickman, N., et al. (1996). National seismic-hazard maps: Documentation June 1996. USGS Open-file Report 96-532, U.S. Geological Survey.
- Gutenberg, B., and Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 34, No. 4, pp. 185-188.
- Han, S.W., and Choi, Y.S. (2008). Seismic hazard analysis in low and moderate seismic region: Korean Peninsula. *Structural Safety*, Vol. 30, No. 6, pp. 543-558.
- Hanks, T.C., and Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 84, No. B5, pp. 2348-2350.
- Hanks, T.C., and McGuire, R. (1981). The character of high frequency strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 6, pp. 2071-2095.
- Jo, N.D., and Baag, C.E. (2001). Stochastic prediction of strong ground motions in southern Korea. *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 5, No. 4, pp. 17-26.
- Jo, N.D., and Baag, C.E. (2003). Estimation of spectrum decay parameter x and stochastic prediction of strong ground motions in southeastern Korea. *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 7, No. 6, pp. 59-70.
- Johnston, A.C. (1996). Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions: I. Instrumental seismicity. *Geophysical Journal International*, Vol. 124, No. 2, pp. 381-414.
- Junn, J.G., Jo, N.D., and Baag, C.E. (2002). Stochastic prediction of ground motions in southern Korea. *Geosciences Journal*, Vol. 6, pp. 203-214.
- Kim, K., Park, J., Park, Y., Hao, T., and Kim, H. (2017). Crustal structure beneath the southern Korean Peninsula from local earthquakes. *Geophysical Journal International*, Vol. 209, No. 2, pp. 969-978.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2012). *Historical earthquake records in Korea*.
- Kyung, J.B., Kim, M.J., Lee, S.J., and Kim, J.K. (2016). An analysis of probabilistic seismic hazard in the Korean Peninsula: Probabilistic peak ground acceleration (PGA). *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 37, No. 1, pp. 52-61.
- Lee, K., and Yang, W.S. (2006). Historical seismicity of Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp. 846-855.
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT). (1997). *A study on seismic design code (II)*. Earthquake Engineering Society of Korea (EESK).
- Mitchell, B.J. (1995). Anelastic structure and evolution of the continental crust and upper mantle from seismic surface wave attenuation. *Reviews of Geophysics*, Vol. 33, No. 4, pp. 441-462.
- National Emergency Management Agency (NEMA). (2012). *Active fault map and seismic hazard map*. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM).
- Noh, M.H., and Lee, K.H. (1995). Estimation of peak ground motions in the southeastern part of the Korean Peninsula (II): Development of predictive equations. *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 31, No. 3, pp. 175-187.
- Rhee, H., Seo, J., Kim, M., and Choi, I. (2011). Comparison of methods for the analysis percentile of seismic hazards. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 15, No. 2, pp. 43-51.
- Sandikkaya, M.A., Akkar, S., and Bard, P. (2013). A nonlinear

- site-amplification model for the next Pan-European ground-motion prediction equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 1, pp. 19-32.
- Sandikkaya, M.A., Akkar, S., and Bard, P. (2018). A probabilistic procedure to describe site amplification factors for seismic design codes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 126, 105068. doi: 10.1016/j.soildyn.2018.01.050
- Sandikkaya, M.A., and Dinsever, L.D. (2018). A site amplification model for crustal earthquakes. *Geosciences*, Vol. 8, No. 7, 264. doi:10.3390/geosciences8070264
- Saragoni, G.R., and Hart, G.C. (1974). Simulation of artificial earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 2, No. 3, pp. 249-267. doi:10.1002/eqe.4290020305
- Schulte, S.M., and Mooney, W.D. (2005). An updated global earthquake catalogue for stable continental regions: Reassessing the correlation with ancient rifts. *Geophysical Journal International*, Vol. 161, No. 3, pp. 707-721.
- Seyhan, E., and Stewart, J.P. (2014). Semi-empirical non-linear site amplification from NGA-West2 data and simulations. *Earthquake Spectra*, Vol. 30, No. 3, pp. 1241-1256.
- Stein, S. (2007). Approaches to continental intraplate earthquake issues. In S. Stein, and S. Mazzotti (Eds.), *Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issue*, The Geological Society of America Special Paper 425, pp. 1-16. doi:10.1130/20007.2425(01)
- Stewart, J., Douglas, J., Javanbarg, M., Bozorgnia, Y., Abrahamson, N.A., Boore, D.M., et al. (2015). Selection of ground motion prediction equations for the global earthquake model. *Earthquake Spectra*, Vol. 31, No. 1, pp. 19-45.
- Sun, C. (2015). Determination of mean shear wave velocity to 30 m depth for site classification using shallow depth shear wave velocity profile in Korea. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 73, pp. 17-28.
- Worden, C.B., Wald, D.J., Sanborn, J., and Thompson, E.M. (2015). Development of an open-source hybrid global Vs30 model. *Seismological Society of America Annual Meeting*, April 21-23, Pasadena, CA, USA.
- Yenier, E., and Atkinson, G.M. (2015). Regionally adjustable generic ground-motion prediction equation based on equivalent point-source simulations: Application to central and eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 4, pp. 1989-2009.

Received ■ September 4, 2019

Revised ■ September 23, 2019

Accepted ■ September 30, 2019