

국내 5개 주요 도시에 대한 등재해도 스펙트럼

김준경¹ · 위성훈^{2,*} · 경재복³

¹세명대학교 소방방재학과, 27136, 충북 제천시 세명로 65

²한국지질자원연구원 지진연구센터, 34132, 대전광역시 유성구 과학로 124

³한국교원대학교, 지구과학교육과, 28173, 충북 청주시 강내면 태성탑연로 250

Uniform Hazard Spectra of 5 Major Cities in Korea

Jun-Kyoung Kim¹, Soung-Hoon Wee^{2,*}, and Jai-Bok Kyung³

¹Department of Fire Protection Engineering, Semyung University, Jecheon-si 27136, Korea

²Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 34132, Korea

³Department of Earth Science Education, Korea national University of Education,
Cheongju-si 28173, Korea

Abstract: Since the Northridge earthquake in 1994 and the Kobe earthquake in 1995 occurred, the concept of performance based design has been introduced for designing various kinds of important structures and buildings. Uniform hazard spectra (UHS), with annual exceedance probabilities, corresponding to the performance level of each structure, are required for performance-based design. The probabilistic seismic hazard analysis was performed using spectral ground motion prediction equations, which were developed from both Korean Peninsula and Central and Eastern US region, and several seismotectonic models suggested by 10 expert panel members in seismology and tectonics. The uniform hazard spectra for 5 highly populated cities in Korea, with recurrence period of 500, 1,000, and 2,500 years using the seismic hazard at the frequencies of 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 Hz and Peak ground acceleration (PGA) were analyzed using the probabilistic seismic hazard analysis. The sensitivity analysis suggests that spectral ground motion prediction equations impact much more on seismic hazard than what seismotectonic models do. The uniform hazard spectra commonly showed a maximum hazard at the frequency of 10 Hz and also showed the similar shape characteristics to the previous study and related technical guides to nuclear facilities.

Keywords: uniform hazard spectra, probabilistic seismic hazard analysis, ground motion prediction equation, seismotectonic model, return period

요약: 최근 미국 노스리지 지진(1994)과 일본 고베 지진(1995) 발생 이후 다양한 구조물 및 건축물을 설계할 때 성능 기반 설계 개념이 적극적으로 도입되고 있다. 성능기반 설계가 도입되면서 구조물 각각의 성능에 적합한 연발생빈도의 등재해도 스펙트럼이 요구되고 있다. 10 인의 지진 및 지체구조 전문가가 제시한 국내 및 미국 중동부에서 개발된 스펙트럴 지반진동 감쇠식과 다수의 지진지체구조 모델을 사용하였다. 인구 밀도가 높은 5개 주요 도시에 대해 확률론적 방법을 이용하여 등지진재해도 스펙트럼을 분석하였다. 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 Hz 및 PGA에 대해 확률론적 지진재해도 결과를 이용하여 500년, 1,000년 및 2,500년의 3개 재현주기에 대해 등재해도 스펙트럼을 분석하였다. 민감도 분

*Corresponding author: shwee@kigam.re.kr

Tel: +82-33-747-0471

Fax: +82-10-9230-7545

석 결과 각각의 고유 진동수에 해당하는 지반진동 감쇠식이 지진지체구조구 모델에 비하여 지진재해도에 보다 커다란 영향을 주었다. 마지막으로 등재해도 스펙트럼은 공통적으로 10 Hz에서 최대값을 보여 주었고, 원자력 관련 기술기준 또는 기존 연구에서 제시된 등지진재해도 스펙트럼과 수준과 모양 특성에서 유사성을 보여주었다.

주요어: 등재해도 스펙트럼, 확률론적 지진재해도 분석, 지반진동 감쇠식, 지진지체구조구 모델, 재현주기

1. 서 론

지진재해로부터 인명 및 각종 구조물을 보호하기 위해 내진설계 개념이 도입되었다. 내진설계는 설계 응답스펙트럼으로 대표가능하며 초기에는 표준 설계 응답스펙트럼의 형태로 설계지진을 적용하였다. 원전 구조물의 내진설계시 적용되는 Regulatory Guide 1.60 (USNRC, 1973)이 대표적인 예이다. 또한 표준 설계 응답스펙트럼의 수준을 결정하기 위해 결정론적 방법을 이용하여 지진재해도값에 해당하는 안전정지 지반 운동(Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, SSE) 개념이 도입되었다.

이후 확률론적 지진 재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA) 개념이 도입되면서 설계 지반운동 평가 시 기존 결정론적 방법으로부터 불확실성의 정량화가 가능하고 다양한 장점을 가진 확률론적 방법을 적용하게 되었다. 원전 내진분야는 Guide 1.165 (USNRC, 1997) 기술기준을 통하여 확률론적 방법이 적용되고 있다.

최근 미국 노스리지 지진(1994)과 일본 고베 지진(1995) 발생 이후 다양한 구조물 및 건축물을 설계할 때 성능기반 설계(Performance-Based Design) 개념이 적극적으로 도입되고 있다. 성능기반 설계가 도입되면서 설계 지반운동으로서 구조물 각각의 성능에 적합한 연발생 빈도의 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum, UHS)이 적용되고 있다. 원전 내진분야는 Reg. Guide 1.208 기술기준에 성능기반 설계기법이 도입되면서 설계 지반운동으로서 연간 10^{-5} 발생 빈도 등의 등재해도 스펙트럼이 적용되고 있다. 또한 ASCE 43-5 (US AEC, 2007)에서도 수평 및 수직성분 설계요소(DF) 등을 적용하여 등재해도 스펙트럼을 규정하고 있다.

확률론적 방법을 이용하여 결정된 설계지반운동은 내진 설계기준에 의거하여 주로 암반 노두(국내의 경우 S_B 로 정의)에서 정의되고 있다. 국내 건축기준은 미국 Uniform Building Code (1997) 기준을 준용하며 최대지반가속도(PGA)(건설교통부, 1997)를 사용하

며, 미국은 단주기 영역(주기 $T=0.2$ 초)과 중장주기 영역(주기 $T=1.0$ 초)의 스펙트럼 가속도 설계응답스펙트럼을 사용한다(International Building Code, 2000).

최근 들어 전지구적 대규모 지진 발생으로 인한 피해가 증가하고 있으며, 그에 따라 다양한 방법을 이용하여 지진재해에 대비하는 필요성이 대두되고 있다. 그러나 국내에서 관측된 강지진동의 부재 등으로 인하여 지진재해 분석시 불확실성이 커다는 단점이 있으며 국내 특성에 적합한 성능기반 설계가 필요하다. 이를 위해 확률론적 지진재해도 분석 기술을 적용하여 등재해도 스펙트럼을 도출하였다.

확률론적인 지진재해 분석은 Cornell(1968)에 의해서 최초로 제안된 후 이후 많은 수정과 보완을 거쳐서 현재 세계적으로 가장 널리 사용되는 방법이다. 지진재해 분석은 지진원, 지진파 감쇠식 및 부지 증폭 특성의 불확실성을 고려하여 특정 기간내 특정 크기 이상의 지반진동이 부지에 발생할 확률을 결정하여 지진의 재현주기 또는 연간초과확률에 대해 설계지반운동 수준을 제시한다. 일반적으로 지진재해 분석은 하부 지반이 암반이 아닌 경우, 암반노두에서 정의된 부지증폭 특성을 고려하여 설계응답스펙트럼을 확보하여야 한다.

10인의 전문가가 제시한 국내외에서 개발된 스펙트럼 지반진동 감쇠식과 다수의 국내 지진지체구조구(Seismotectonic Province) 모델을 사용하여 인구 및 산업 밀집도가 높은 5개 주요 도시에 대해 확률론적 지진재해도 분석을 수행하였다. 하지만 국내에서 개발된 일부 지반진동 감쇠식의 경우, 관측소의 지반 특성에 대한 상세 정보 미흡, 규모 5.0 이상의 강지진동 관측자료 부족, 관측된 지반진동의 진앙거리의 범위, 관측 지역의 제한성 등 일부 문제점이 제시되었다.

이를 해결하기 위해 전문가와 피드백 과정을 통해 지진재해도를 분석하였다. 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 Hz 및 PGA에 대해 확률론적 방법을 이용하여 500년, 1,000년, 2,500년의 3개 재현주기에 대해 등재해도 스펙트럼을 분석하였다. 미국 국가지진재해도 역시

500년, 1,000년, 2,500년의 3개 재현주기에 대해 제시하고 있다.

2. 확률론적 지진재해도 분석

확률론적 지진재해도 분석은 특정 부지 또는 국내 전체 지역을 대상으로 발생 가능한 모든 규모와 거리의 지진에 대한 연초과 확률을 산출하는 것이다. 지진재해도 분석에는 다수의 입력변수가 사용되며, 입력변수는 지진자료가 가지는 필연적인 불확실성이 내재되어 있다. 확률론적 지진재해도 분석에서는 입력변수들의 불확실성을 효과적으로 반영하기 위하여 논리수목(logic tree)을 이용하여 재해도 분석을 수행한다.

확률론적 지진재해도 분석은 우선 면적 지진원을 유한한 수의 격자로 분할한 후, 각 격자의 지진활동도(Seismicity)를 정의한다. 아직 국내 선지진원의 불확실성이 높기 때문에 면적지진원만을 고려하였다. 지진활동도는 일반적으로 다음과 같이 정의되는 Gutenberg-Richter(1944) 관계식의 변수들로 구성된다.

$$\log(N) = a - b \cdot M \quad (1)$$

식 (1)에서, M 은 지진규모, N 은 지진규모 M 을 초과하는 지진의 단위 면적당 연간 발생횟수의 합, a 와 b 는 상수이다. a 와 b 는 각각 G-R 상수이며 규모 및 연간초과확률 관계곡선의 절편과 기울기를 의미한다. 따라서 a 와 b 는 지진활동도를 나타내는 변수이다.

임의 지역에서 미래 발생할 지진에 의한 지반진동의 크기를 정의하기 위해서는 지반진동감쇠식(Ground Motion Prediction Equation)이 필요하고 지반진동 감쇠식은 PGA 또는 스펙트럴 가속도를 지진규모와 진앙거리의 함수로 나타낸다. 전문가가 제시한 지진지체구조 모델내부의 모든 격자의 지진활동도 변수와 해석에 적용할 감쇠공식을 선택한 후 원하는 위치에서 특정 설계지반운동 값의 연간초과확률을 계산한다.

각 지진지체구조 모델은 대부분 한 개 또는 몇 개의 보다 작은 지진원 지역으로 구성되어 있다. 작은 지진원 지역을 위도 및 경도 각각 0.1° 격자로 나누어 각 격자에 해당되는 a , b , 최대지진 및 최소지진 값을 부여한다. 다음 분석하고자 하는 격자 모서리점에서 모든 지진원 지역에 의한 지진재해도를 계산하여 합쳐 나가는 과정이다.

3. 지진재해도 입력자료

3.1. 국내 지진자료 종류

각각 지진지체구조 모델의 a , b , 최대지진, 최소지진값을 계산할 때 결과의 신뢰성을 높이기 위해 10인의 전문가가 국내에서 이미 검증된 지진자료인 Lee and Yang(2006), 기상청(2012) 또는 한국지질자원연구원(2012) 등 지진자료 카탈로그를 이용하도록 유도하였다.

3.2. 지진지체구조 모델

10인 해당 분야 전문가는 각각 제시한 다양한 지진지체구조 모델(KIGAM, 2012)을 사용하여 지진재해도 분석을 수행하였다. 일부 전문가는 이미 개발되어 있는 지진지체구조 모델을 단수 또는 복수로 선택하여 제시하였다. 일부 전문가는 자신의 고유 지진지체구조 모델을 제시하였다.

3.3. a , b , 최대지진 및 최소지진값

10인의 해당 분야 전문가가 제시한 지진지체구조 모델(KIGAM, 2012) 각각에 대해 지진 카탈로그의 완성도를 고려하여 역사지진 전체, 조선시대 지진, 삼국시대 지진 및 계기지진 자료 등 관측기간에 따라 다른 가중치를 제시하였다. 전문가가 제시한 지진자료의 시대별 가중치를 활용하여 a , b , 최대지진 및 최소지진 값을 적용하였다. 임의 전문가가 제시한 입력자료 예는 Table 1에 제시되어 있다.

3.4. 지반진동 감쇠식 모델

10인 전문가가 각각 제시한 다양한 지반진동 감쇠식 모델을 사용하여 지진재해도 분석을 수행하였다. 일부 전문가는 이미 개발되어 있는 주로 미국 중동부 지역에서 개발된 모델 등(Abrahamson and Silva, 2008; Atkinson and Boore, 1997; Atkinson & Silva, 2000; Boor and Atkinson, 2008; Boore and Atkinson, 2011; Campbell, 2003; Toro et al. 1997)을 조합하여 제시하였고, 일부 전문가는 국내에서 개발된 모델(Noh and Lee, 1995; Lee, 2002; Jo and Baag, 2003; Yun et. al., 2005) 등과 미국 중동부 지역에서 개발된 모델을 조합하여 제시하였다. 일반적으로 국내 지진지체구조에서 지반진동 감쇠 특성이 지질적 구조 활동이 활발한 미국 서부 지역 보다 상대적으로 안정된 미국 중동부와 유사하다고 알려져 있다

Table 1. An Example of Input parameters for PSHA for Expert Panel #7

Source Map Type (Weight)	Source Zone	Era (Weight)	Period (yr)	a value	b value	Mmax	Mmin	GMPE (Weight)
A3 (0.7)	S1	Samguk (0.05)	2-935	2.96904	0.55265	6.5	4	Lee, J.M., 2002 (0.3), Jo & Baag (0.4) Yun et. al., 2005 (0.3)
	S1	Koryo (0.05)	936-1391	2.96904	0.55265	6.5	4	
	S1	Chosun (0.3)	1392-1810	2.96904	0.55265	6.5	4	
	S1	Instrumental (0.6)	1906-2011	2.9402	0.64672	6.5	4	
	S2	Samguk (0.05)	2-935	5.29396	1.03435	7	4	
	S2	Koryo (0.05)	936-1391	5.29396	1.03435	7	4	
	S2	Chosun (0.3)	1392-1810	5.29396	1.03435	7	4	
	S2	Instrumental (0.6)	1906-2011	4.97213	1.00005	7	4	
	S3	Samguk (0.05)	2-935	4.63543	0.80217	7	4	
	S3	Koryo (0.05)	936-1391	4.63543	0.80217	7	4	
	S3	Chosun (0.3)	1392-1810	4.63543	0.80217	7	4	
	S3	Instrumental (0.6)	1906-2011	5.91569	1.31504	7	4	
	S4	Samguk (0.05)	2-935	4.82039	0.86564	7	4	
	S4	Koryo (0.05)	936-1391	4.82039	0.86564	7	4	
	S4	Chosun (0.3)	1392-1810	4.82039	0.86564	7	4	
	S4	Instrumental (0.6)	1906-2011	3.95576	0.83917	7	4	
	S5	Samguk (0.05)	2-935	3.92778	0.68906	7	4	
	S5	Koryo (0.05)	936-1391	3.92778	0.68906	7	4	
	S5	Chosun (0.3)	1392-1810	3.92778	0.68906	7	4	
	S5	Instrumental (0.6)	1906-2011	4.04398	0.90946	7	4	
C1 (0.3)	S1	Samguk (0.05)	2-935	5.27475	0.85167	7	4	
	S1	Koryo (0.05)	936-1391	5.27475	0.85167	7	4	
	S1	Chosun (0.3)	1392-1810	5.27475	0.85167	7	4	
	S1	Instrumental (0.6)	1906-2011	5.54696	0.97074	7	4	

(Abrahamson and Silva, 2008). 지진재해도는 사용된 지반진동 감쇠식 모델을 고려하여 NEHRP B/C 지반 (760 m/sec, VS30)으로 정의하였다. 따라서 실제 적용시 하부 지반의 성질에 따라 NEHRP B/C 지반에서 정의된 지진재해도는 부지증폭 특성이 고려하여야 한다.

진동수별 지반진동 감쇠식 모델을 개발하기 위해 다수의 강진 기록이 요구되지만, 국내처럼 6.0 이상 큰 규모의 지진이 거의 발생하지 않는 지역에서는 추계학적 모사를 이용하여 연구를 수행하고 있다. 하지만 실제 관측 지진자료를 이용할 경우 국내 관측소 지반에 대한 상세 정보, 규모 5.0 이상의 강지진동 관측자료 부족, 관측된 지반진동의 진앙거리의 범위, 관측 지역의 제한성 등 다수의 문제점이 존재한다.

4. 민감도 분석

확률론적 지진재해도 분석에는 다수의 입력변수가 사용되기 때문에 각 입력변수가 재해도에 미치는 영향 분석을 민감도 분석을 통해 수행하였다. 이를 통

해 지진재해도 결과의 신뢰성을 검증하고 있다. 민감도 분석은 확률론적 지진재해도 분석에 가중치를 가지고 사용된 다양한 입력변수 중에서 하나의 변수만을 변화시키며 상호 비교 및 분석하는 방법으로 수행된다.

4.1. 지진지체구조 모델 변화에 대한 지진재해도 분석

10인의 전문가가 지진지체구조 모델에 가중치와 함께 복수로 조합하여 제시하였고 가장 빈번하게 제시된 지진지체구조 모델(A7, C1, C3, C4 및 C5)을 선택하여 영향을 분석하였다. 국내 임의 지역의 지진재해도가 아니고 국내 최대 지진재해도를 선택하여 분석에 이용하였다. 우선 감쇠식 모델을 고정하고 지진지체구조 모델 변화에 대한 재현주기 1,000년에 해당하는 지진재해도를 분석하였다. 다음 감쇠식 모델을 차례로 번갈아 가며 고정하고 지진지체구조 모델 변화에 대한 지진재해도를 분석하였다. 하나의 지진지체구조 모델이 선택되면 이에 따른 a, b, 최대지진 및 최소지진값이 따라서 결정된다.

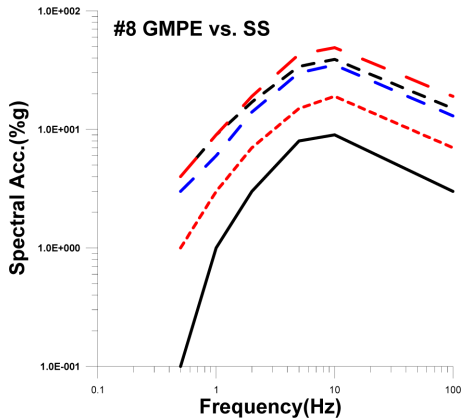


Fig. 1. Sensitivity of maximum seismic hazard to five seismotectonic models at fixed ground motion attenuation model #8

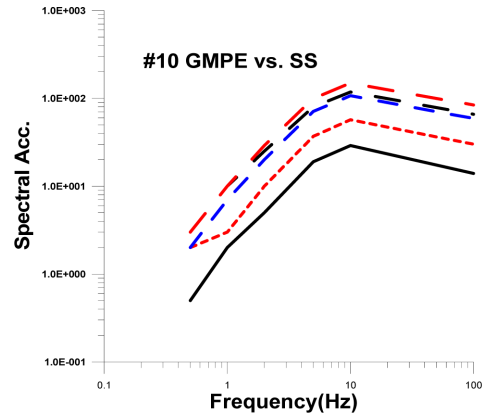


Fig. 2. Sensitivity of maximum seismic hazard to five seismotectonic models at fixed ground motion attenuation model #10

10인 전문가가 제시한 감쇠식은 각각 전문가마다 약 3개에서 4개 정도이며 중복되는 경우도 있다. 미국 중동부에서 개발된 다수의 감쇠식을 제시하였고 일부 전문가는 국내 개발 감쇠식과 혼합하여 제시하였다.

Fig. 1은 #8 감쇠식을 고정하고 전문가가 제시한 5개 지진지체구조구 모델에 대해 재현주기 1,000년의 등재해도를 분석하였다. #8 감쇠식은 미국 중동부에서 개발된 다수의 감쇠식 가운데 하나이며 Table 2에 제시되어 있다.

저진동수(0.5 Hz) 즉 장주기에서 고진동수로 이동할수록 재해도가 지진지체구조구 모델 상호간에는 서로 거의 평행하게 서서히 증가하고 10 Hz에서 최대를 이루고 있다. 이후 다시 감소하여 PGA로 수렴되고 있다. PGA값은 영주기(Zero Period Acceleration, ZPA)에 해당하는 값이나 등재해도에서는 고진동수에 수렴값으로 간주되어 일반적으로 약 100 Hz에 표시된다. 지진재해도가 가장 높은 지진지체구조구 모델은 C5이고 C4, C3, C1, A7 순서대로 감소하고 있다. 결과는 Reg. Guide 1.208 (US NRC, 2007), ASCE 43-5 (US NRC, 2007) 및 기존 연구(Hahm et al., 2012) 등에서 제시한 등지진재해도 스펙트럼의 모양 특성과 부합하는 형태를 보여주고 있다. 10 Hz에서 지진재해도는 A7 및 C5에서 각각 9%g 및 49%g로서 약 5.44배의 차이를 보여 주었다.

Fig. 2는 #10 감쇠식(Table 2)으로 고정하고 지진지체구조구 모델에 대해 재현주기 1,000년의 등재해도를 분석하였다. #10 역시 미국 중동부에서 개발된 다

수의 감쇠식 가운데 하나이다. 저진동수(0.5 Hz) 즉 장주기에서 고진동수로 이동할수록 재해도가 감쇠식 상호간에는 서로 거의 평행하게 서서히 증가하고 10 Hz에서 최대를 이루고 다시 감소하여 PGA로 수렴되고 있다.

지진재해도 크기에 따른 지진지체구조구 모델 순서는 #8 감쇠식과 동일하며 앞서 제시한 바와 같이 기존 연구 및 다양한 기술기준 등에서 결과된 등지진재해도 스펙트럼 모양 특성과 부합하는 형태를 보여주고 있다. 10Hz에서 지진재해도는 A7 및 C5에서 각각 29%g 및 149%g로서 약 5.14 배의 차이를 보여준다.

Fig. 3은 #104 감쇠식을 고정하여 등재해도를 분석하였다. #104는 국내에서 개발된 다수의 감쇠식 가운데 하나이다. 앞에서 제시된 결과에 비교할 때 0.5 Hz에서 재해도가 1 Hz 보다 훨씬 크고 1 Hz부터 고진동수로 이동할수록 재해도가 감쇠식 상호간에는 서로 거의 평행하게 서서히 증가하고 있다. 이후 10Hz에서 최대를 이루고 다시 감소하여 PGA값으로 수렴되고 있다.

가장 높은 지진지체구조구 모델은 C3이고 C4, C5, C1, A7 순서대로 감소하고 있다. 결과는 기존 연구 및 기존 연구 및 다양한 기술기준 등에서 결과된 등지진재해도 스펙트럼 모양 특성으로부터 특히 0.5 Hz에서 다소 벗어난 형태를 보여주고 있다. 10 Hz에서 지진재해도는 A7 및 C3에서 각각 5%g 및 22%g로서 약 4.4배의 차이를 보여준다.

Fig. 4는 #106 감쇠식(Table 2)을 고정하여 등재해

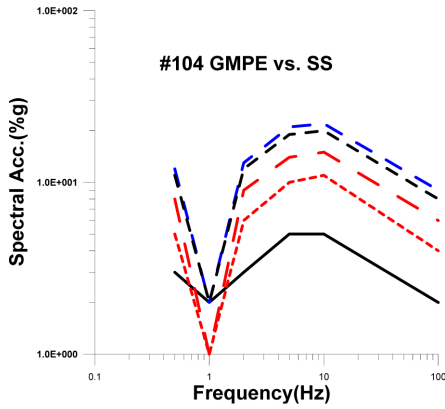


Fig. 3. Sensitivity of maximum seismic hazard to five seismotectonic models at fixed ground motion attenuation model #104

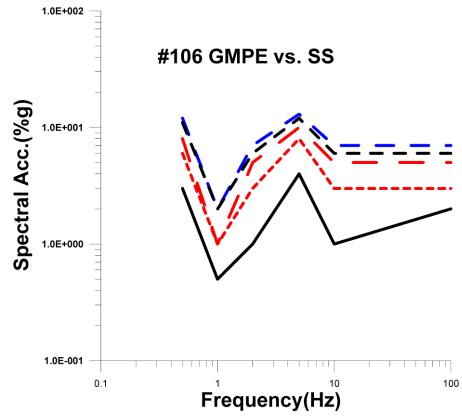


Fig. 4. Sensitivity of maximum seismic hazard to five seismotectonic models at fixed ground motion attenuation model #106

도를 분석하였다. #106 역시 국내에서 개발된 다수의 감쇠식 가운데 하나이다. 0.5 Hz에서 지진재해도가 1 Hz 보다 훨씬 크고 1 Hz부터 고진동수로 이동할수록 재해도가 감쇠식 상호간에는 서로 거의 평행하게 서서히 증가하고 있다. #106 감쇠식과 달리 5 Hz에서 최대를 이루고 다시 감소하여 10 Hz와 PGA가 거의 동일하다. 가장 높은 지진지체구조구 모델은 C3 이고 C4, C5, C1, A7 순서대로 감소하고 있다. 결과는 기존 연구 및 Reg. Guide 1.208 등에서 예시한 일반적 등지진재해도 스펙트럼으로부터 특히 0.5 Hz 및 10 Hz에서 다소 벗어난 형태를 보여주고 있다. 10 Hz에서 지진재해도는 A7 및 C5에서 각각 1%g 및 7%g로서 7 배의 차이를 보여준다.

10인의 전문가가 가장 빈번하게 제시한 5개 지진지체구조구 모델에 대해 국내 개발된 일부 감쇠식 (#104 및 #106)을 이용한 결과는 전형적 등지진재해도 스펙트럼 모양으로부터 다소 벗어나 있다. 따라서 전문가에게 결과를 제시하고 전문가가 감쇠식을 변경

하거나 기중치 수정 등을 거치는 피드백 과정을 수행하였다. 입력자료 설정 단계에서 피드백 과정은 미국 원자력위원회가 원전관련 구조물 인허가 과정에서 적용되는 기술기준인 SSHAC (US NRC, 2012)에서 가장 중요한 사항이다.

4.2. 감쇠식의 변화에 대한 지진재해도 분석

10인의 전문가가 지반진동 감쇠식을 복수로 조합하여 가중치와 함께 제시하였고 가장 빈번하게 제시된 다수의 감쇠식을 선택하여 민감도 분석을 수행하였다. 지진원 변수(a, b, 최대지진 및 최소지진 규모) 및 지진지체구조구 모델을 고정하고 감쇠식 변화에 대한 재현주기 1,000년에 해당하는 지진재해도를 분석하였다.

Fig. 5 및 6은 A7 지진지체구조 모델로 고정하고 재현주기 1,000년에 대한 등재해도 분석이다. Fig. 5는 미국 중동부에서 개발된 다수의 감쇠식을 이용한 결과이고 Fig. 6은 국내 개발 감쇠식을 이용한 결과

Table 2. Ground Motion Prediction Equations for Sensitivity Analysis

GMPE Model Number	Reference	Remarks
#8	Abrahamson and Silva, Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations, Earthquake Spectra, 24(1), 67-97, 2008.	
#10	Campbell, K. W. Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground motion (attenuation) relations in eastern North America. Bulletin of the Seismological Society of America, 93, 1012-1033, 2003.	
#104	Lee, A study on the characteristic of strong ground motions in southern Korea. KINS/HR-422. Daejeon: Korea Institute of Nuclear Safety; 2002.	
#106	Jo and Baag, Estimation of Spectrum Decay Parameter and Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southeastern Korea. EESK J. 7(6), 59-70, 2003.	

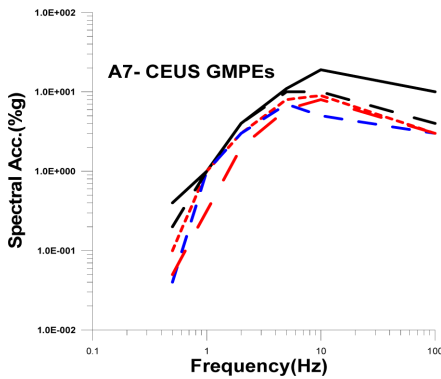


Fig. 5. Sensitivity of maximum seismic hazard to five foreign ground motion attenuation models at fixed seismotectonic models A7

이다. Fig. 5는 저진동수(0.5 Hz) 즉 장주기에서 고진동수로 이동할수록 재해도가 감쇠식 상호간에는 서로 교차하면서 서서히 증가하고 10 Hz에서 최대를 이루고 다시 감소하여 PGA값으로 수렴되고 있다. 결과는 기존 연구(Hahm et al., 2012) 및 다양한 기술기준에서 예시한 전형적 등지진재해도 스펙트럼의 모양 특성과 부합된 형태를 보여주었다.

국내 개발 일부 감쇠식을 이용한 결과(Fig. 6)는 0.5 Hz에서 진동수가 증가할수록 다소 불규칙적인 특성을 보여주고 일반적 등지진재해도 스펙트럼 형태로 부터 다소 벗어나 있다. 민감도 분석을 위해 10Hz에서 지진재해도는 #106 및 #10에서 각각 1%g 및 29%g로서 약 29 배의 차이를 보여준다.

Fig. 7 및 8은 C1 모델에 대한 등재해도 분석이다. Fig. 7은 미국 중동부에서 개발된 다수의 감쇠식을 이용한 결과이고 Fig. 8은 국내 개발 감쇠식을 이용한 결과이다. 저진동수(0.5 Hz) 즉 장주기에서 고진동수로 증감 특성은 A7 모델과 각각 유사하다. 역시 Reg. Guide 1.208에서 제시된 등지진재해도 스펙트럼과 일관된 형태를 보여주고 있다.

국내 개발 일부 감쇠식을 이용한 결과(Fig. 7)는 0.5 Hz에서 진동수가 증가할수록 다소 불규칙적인 특성을 보여주고 일반적 등지진재해도 스펙트럼 형태로 부터 다소 벗어나 있다. Fig. 7 및 8을 함께 고려할 때 10 Hz에서 지진재해도는 #106 및 #10에서 각각 3%g 및 57%g 로서 약 19 배의 차이를 보여준다.

Fig. 9 및 10은 C5 모델에 대한 등재해도 분석이다. Fig. 9는 미국 중동부에서 개발된 다수의 감쇠식을 이용한 결과이고 Fig. 10은 국내 개발 감쇠식을

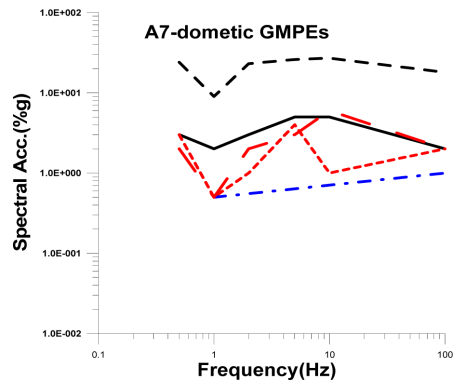


Fig. 6. Sensitivity of maximum seismic hazard to five domestic ground motion attenuation models at fixed seismotectonic models A7

이용한 결과이다. 저진동수(0.5 Hz) 즉 장주기에서 고진동수로 증감 특성은 A7 모델과 각각 유사하다. 역시 Reg. Guide 1.208에서 예시한 등지진재해도 스펙트럼과 일관된 형태를 보여주고 있다. 동일하게 10 Hz에서 지진재해도는 #106 및 #10에서 각각 5%g 및 149%g로서 29.8배의 차이를 보여준다.

이상에서 분석한 바와같이 감쇠식의 변화를 이용하여 10 Hz의 지진재해도의 최대 및 최소를 비교하면 19-29.8배의 차이를 보여주고 있다. 또한 지진지체구조 모델의 변화를 이용한 경우 4.4-7배의 차이를 보여주고 있어 감쇠식의 변화가 지진지체구조 모델 변화 보다 지진재해도에 상대적으로 보다 큰 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 이러한 감쇠식의 영향에 대해서는 이미 제시된 바가 있다(Silva et al., 1999).

또한 국내 개발 일부 감쇠식을 이용한 결과는 미국 중동부 감쇠식 보다 국내 지진지체구조 특성을 대표한다고 할 수 있으나 일반적 등지진재해도 스펙트럼 모양에서 다소 벗어나 있다. 따라서 전문가에게 분석 결과를 제시하고 각각 전문가가 제시한 감쇠식을 변경하거나 가중치 조정을 거치는 피드백 과정을 수행하였다. 입력자료 설정 단계에서 피드백 과정은 미국 원자력위원회가 원자력관련 구조물의 인허가 과정에서 적용되는 기술기준인 SSHAC (US NRC, 2012) 이 특히 강조하는 중요 사항이다.

확률론적 지진재해도의 불확실성을 감소시키고 정량화 목적을 위해 SSHAC (US NRC, 2012) 과정이 개발되었고 모두 4개의 수준이 있으며 이후 건설되는 원자력 구조물에 대해 미국 원자력 위원회는 3이상

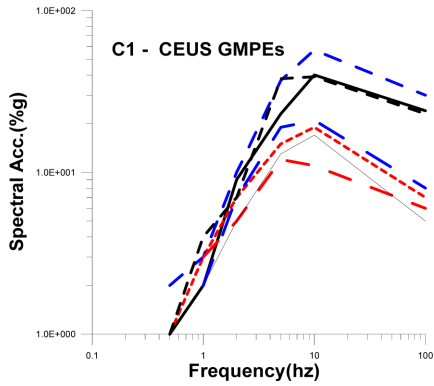


Fig. 7. Sensitivity of maximum seismic hazard to five foreign ground motion attenuation models at fixed seismotectonic models C1

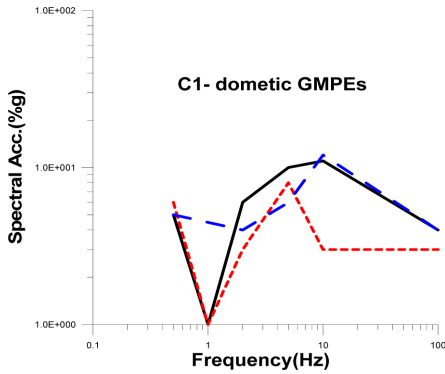


Fig. 8. Sensitivity of maximum seismic hazard to five domestic ground motion attenuation models at fixed seismotectonic models C1

의 수준을 요구하고 있다. 국내에서도 최근 SSHAC (US NRC, 2012) 과정이 시범적으로 수행되고 있는 것으로 알려져 있다.

5. 등지진재해도 스펙트럼

5개 주요 도시에 대해 주어진 주요 진동수 0.5, 1, 2, 5, 10 Hz에서 지진재해도 및 PGA를 이용하여, 3개의 재현주기(2500년, 1000년 및 500년)에 대해 등재해도 스펙트럼을 분석하였다. 앞서 제시한 바와같이 PGA 재해도는 일반적으로 100.0 Hz에 표시하였다. 진동수별 재해도 분석 결과를 내진설계시 가장 빈번하게 인용되는 500년(2.0E-03/yr), 1000년(1.0E-03/yr), 2500년(4.0E-04/yr)의 재현주기 재해도를 이용하여 등재해도 스펙트럼을 분석하였으며, Fig. 11-15

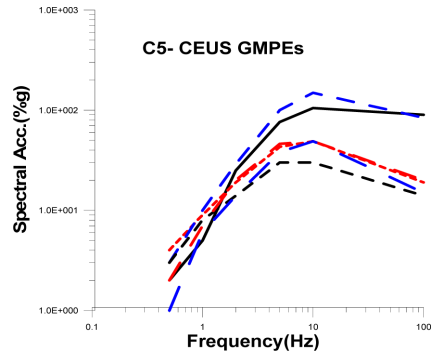


Fig. 9. Sensitivity of maximum seismic hazard to five foreign ground motion attenuation models at fixed seismotectonic models C5

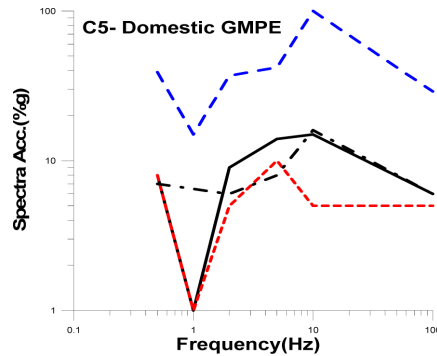


Fig. 10. Sensitivity of maximum seismic hazard to five domestic ground motion attenuation models at fixed seismotectonic models C5

에 제시되어 있다.

Fig. 11 및 Table 3은 서울 지역의 등재해도 스펙트럼이며, 재현주기 500년, 1,000년, 2,500년에 대한 진동수별 재해도를 나타내고 있다. 재현주기가 증가할수록 등재해도가 점차적으로 크게 나타나고 있다. 3개 등재해도 스펙트럼 공통적으로 0.5Hz에서 가장 작고 고진동수로 이동할수록 재해도가 재현주기 상호간에는 서로 거의 평행하게 서서히 증가하고 10Hz에서 최대값(PGA의 약 2배)을 이루고 다시 감소하여 PGA값으로 수렴되고 있다. 서울 지역의 PGA 재해도는 Table 3에 제시된 바와같이 500년, 1,000년, 2,500년에 대한 각각 0.07, 0.10, 0.16 g이다.

Fig. 12 및 Table 3은 대전 지역의 등재해도 스펙트럼이며, 재현주기가 증가에 따라 10 Hz에서 최대, 증가하다가 다시 감소하여 PGA값으로 수렴되고 있는 특징이 서울지역과 유사하다. 대전 지역의 PGA 재해도는 Table 3에서 제시된 바와같이 500년, 1,000

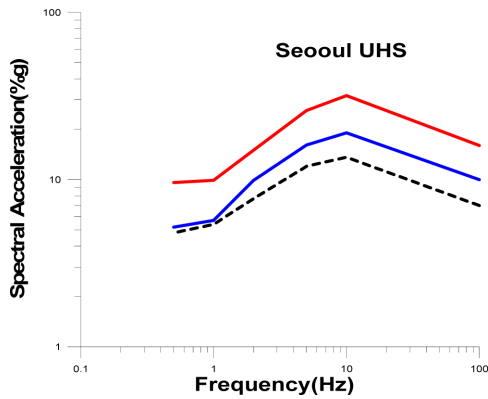


Fig. 11. UHS for return periods (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Seoul

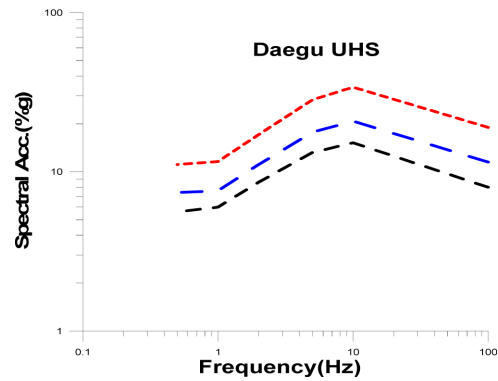


Fig. 13. UHS for return periods (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Daegu

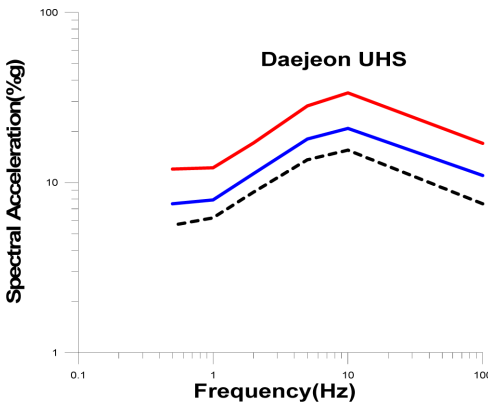


Fig. 12. UHS for return periods (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Daejeon

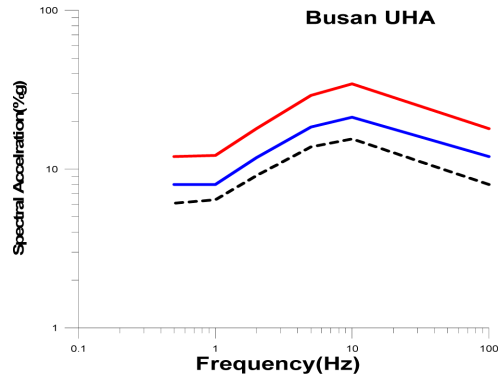


Fig. 14. UHA for return periods (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Busan

년, 2,500년에 대해 각각 0.075, 0.11, 0.17 g이고 해당 재현주기에서 서울지역보다 미세하게 높은 재해도를 보여주고 있다.

Fig. 13 및 Table 3은 대구 지역의 등재해도 스펙트럼이며, 재현주기가 증가할 때 10 Hz에서 최대이고 다시 감소하여 PGA값으로 수렴되고 있는 특징이 앞선 2개 지역과 유사하다. PGA는 Table 3에서 제시된 바와같이 500년, 1,000년, 2,500년에 대한 각각 0.0g, 0.115, 0.19 g이고 해당 재현주기에서 5개 도시 가운데 가장 높은 재해도를 보여주고 있다.

Fig. 14 및 Table 3은 부산 지역의 등재해도 스펙트럼이며 재현주기가 증가, 10 Hz에서 최대, 다시 감소하여 PGA로 수렴되고 있는 특징이 앞선 지역과 유사하다. PGA는 Table 3에서 제시된 바와같이 500년, 1,000년, 2,500년에 대해 각각 0.08, 0.12, 0.18 g이다.

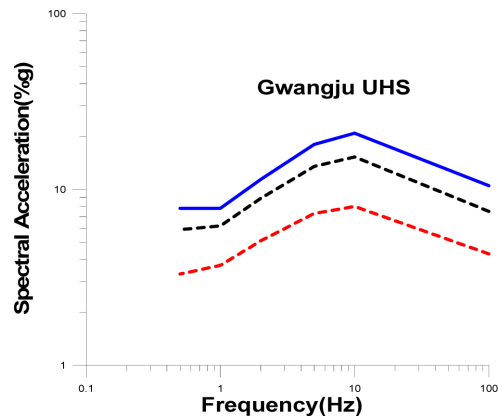


Fig. 15. UHS for return periods (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Gwangju

Fig. 15 및 Table 3은 광주 지역의 등재해도 스펙트럼이며 PGA 재해도는 제시된 바와같이 500년, 1,000년, 2,500년에 대한 PGA는 각각 0.075, 0.105,

Table 3. Seismic Hazard at Seoul, Daejeon, Daegu, Busan and Gwangju (%g)

City	HzRP	PGA	Frequency				
			10	5	2	1	0.5
Seoul	2,500	16	31.8	25.9	15	9.9	9.6
	1,000	10	19.03	16.08	9.9	5.7	5.2
	500	7	13.6	12	7.7	5.4	4.8
Daejeon	2,500	17	33.66	26.2	17.1	12.2	12
	1,000	11	20.8	18	11.3	7.9	7.5
	500	7.5	15.5	13.6	8.8	6.2	5.6
Daegu	2,500	19	34	28.3	17.1	11.6	11.1
	1,000	11.5	20.8	17.7	11.1	7.6	7.4
	500	8	15.2	13.2	8.6	6	5.6
Busan	2,500	18	34.4	29.1	18	12.2	12
	1,000	12	21.2	18.4	11.8	8	8
	500	8	11.5	13.8	9.1	6.4	6.1
Gwangju	2,500	16.5	34.1	28.5	17.4	11.8	11
	1,000	10.5	20.9	18	11.4	7.8	7.8
	500	7.5	15.3	13.5	8.9	6.2	5.9

0.165 g이다.

PGA를 기준으로 할 경우 대구의 지진재해도가 상대적으로 가장 크고 부산, 대전, 광주 및 서울의 순서이며 10 Hz를 기준으로 할 경우 부산의 지진재해도가 상대적으로 가장 크다. 특히 PGA를 기준으로 할 경우 기존의 건교부(1997)에서 제시된 지진재해지도 양상과 유사한 특징을 보여주고 있다. 기존 연구에서 국내 7개 도시 평균 PGA는 각각 0.05, 0.09, 0.15 g로 제시하고 있으며 Table 3에 제시된 바와 같이 기존 연구(Hahm et al., 2012) 보다 미세하게 높은 편이다.

6. 결론

(1) 5개 주요 도시 등재해도 스펙트럼은 5개 지역의 3개 재현주기(500년, 1,000년, 2,500년)가 모두 공통적으로 10.0 Hz에서 최대값을 나타내고 있으며, 재현주기가 늘어남에 따라 전체 진동수 별 지진재해도 값이 커지는 것을 확인하였다. 10.0 Hz에서 2,500년, 1,000년 및 500년 재현주기 각각에 대해 5개 도시 상호간 최대값 및 최소값의 차이가 각각 0.03, 0.0217, 0.04 g이며 연구 지역에 따른 재해도의 차이가 크지 않았다.

(2) 2,500년 재현주기에 대해 대구의 지진재해도가 상대적으로 가장 크고 부산, 대전, 광주 및 서울의 순서이며 기존의 건교부(1997)에서 제시된 지진재해지도와 비교할 때 유사한 특징을 보여주고 있다. 기

존 연구에서 국내 7개 도시 평균 PGA 지진재해도는 각각 500년, 1,000년, 2,500년 재현주기 각각에 대해 0.05, 0.09, 0.15 g로 제시하고 있으며 본 연구에서 각 도시의 PGA 지진재해도가 기존 연구 평균값 보다 미세하게 높은 값을 보여 주었다. 하지만 분석코드 및 전문가들의 상이성 등을 고려하면 커다란 차이는 아닌 것으로 판단된다.

(3) 지반진동 감쇠식의 변화가 지진지체구조구 모델 변화 보다 등재해도 스펙트럼에 상대적으로 더욱 큰 영향을 미치고 있음을 보여주었다. 따라서 향후 국내 지진지체구조구 특성을 대표하는 감쇠식의 개발이 중요하다.

(4) 국내 개발 일부 감쇠식을 이용할 경우 저진동수 등에서 일반적 등지진재해도 스펙트럼 형태로부터 다소 벗어나 있다. 이는 국내 관측소 지반에 대한 상세 정보, 규모 5.0 이상의 강지진동 관측자료 부족, 관측된 지반진동의 진앙거리의 범위, 관측 지역의 제한성 등 문제점으로부터 기인하는 것으로, 향후 국내 지진지체구조구 특성을 대표하는 진동수별 지반진동 감쇠식에 대해 보다 적극적인 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(MPSS-자연-2013-70).

References

- Abrahamson, N. and Silva, W., 2008, Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*, 24, 67-97.
- Atkinson, G.M. and Boore, D.M., 1997, Some comparisons between recent ground motion relations. *Seismological Research Letters*, 68, 24-40.
- Atkinson, G.M. and Silva, W., 2000, Stochastic modeling of California ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 255-274.
- Boore, D.M. and Atkinson, G.M., 2008, Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.001 s and 10.0 s. *Earthquake Spectrum*, 24, 99-138.
- Boore, D.M. and Atkinson, G.M., 2011, Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 121-1135.
- Campbell, K.W., 2003, Prediction of strong ground motion using the Hybrid Empirical Method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 1012-1033.
- Cornell, C.A., 1968, Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1944, Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 164-176.
- Hahm, D.G., Seo, J.M., Choi, I.K., and Rhee, H.M., 2012, Uniform hazard spectrum evaluation method for nuclear power plants on soil sites based on the hazard spectra of bedrock sites. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 16, 35-42.
- ICBO, 1997, 1997 Uniform Building Code, Volume 2-Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials.
- International Building Code, 2000, International Code Council.
- Jo, N.D. and Baag, C.E., 2003, Estimation of spectrum decay parameter and stochastic prediction of strong ground motions in southeastern Korea. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 7, 59-70.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2012, Active fault map and seismic hazard map (the 3rd year report). NEMA-science-2009-24, 900 (in Korean).
- KMA (Korea Meteorological Agency), 2012, Historical earthquake records in Korea (2-1904). Vol. I and II (in Korean).
- Lee, J.M., 2002, A study on the characteristics of strong ground motions in southern Korea. KINS/HR-422, Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon.
- Lee, K., and Yang, W., 2006, Historical seismicity of Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 846-855.
- Ministry of Construction & Transportation, 1997, Research of Seismic Design Code (II). *Earthquake Engineering Society of Korea* (in Korean).
- 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 Geological Society of Korea*, 31, 175-187.
- Silva, W.J., Li, S., Darragh, R.B., and Cregor, N., 1999, Surface geology based strong motion amplification factors for the San Francisco Bay and Los Angeles areas: APEARL report to PG&E/CEC/CalTrans, Award No.SA212059652.
- Toro, G.R., Abrahamson, N.A., and Schneider, J.F., 1997, Model of strong ground motions from earthquakes in Central and Eastern North America: Best estimates and uncertainties. *Seismological Research Letters*, 68, 41-57.
- USNRC, 1973, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, Revision 1, Regulatory Guide 1.60, U.S. Atomic Energy Commission, Washington.
- USNRC, 1997, Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.165, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington.
- USNRC, 2007, Evaluation of the seismic design criteria in ASCE/SEI standard 43-05 for application to nuclear power plants, NUREG/CR-6926.
- USNRC, 2007, A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.208, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington.
- USNRC, 2007, Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of expert, NUREG/CR-6372.
- USNRC, 2012, Practical implementation guidelines for SSHAC level 3 and 4 hazard studies NUREG-2117.
- Yun K.H., Park, D.H., Choi, W.H., Chang, C.J., and Lee, D.S., 2005, Development of site-specific ground-motion attenuation relations for Nuclear Power Plant sites and study on their characteristics. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea fall workshop*, 418-430.

Manuscript received: April 20, 2016

Revised manuscript received: May 27, 2016

Manuscript accepted: May 29, 2016