Fire Sci. Eng., Vol. 31, No. 1, pp. 26-35, 2017 eISSN: 2508-6804
DOI: https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.1.026 pISSN: 1738-7167

[Research Paper]

소방시설의 내진설계를 위한 등재해도 스펙트럼

김준경 · 정기신†
세명대학교 소방방재학과

Uniform Hazard Spectrum for Seismic Design of Fire Protection Facilities

Jun-Kyoung Kim · Keesin Jeong†
Dept. of Fire and Disaster Prevention of Semyung University

(Received December 13, 2016; Revised January 3, 2017; Accepted January 20, 2017)

요 약

미국 노스리지 지진(1994)과 일본 고베지진(1995) 발생 이후 다양한 구조물 및 건축물을 설계 할 때 성능기반 내진설계 개념을 적용하고 있다. 최근 국내 소방시설물에 대해서도 내진설계기준이 제정되어 내진설계 규정에 따라 적합하게 설계되어야 한다. 성능기반 설계가 도입되면서 구조물 중요도에 따라 기능수행, 즉시복구, 인명보호, 붕괴방지 등 각각의 성능에 적합한 연발생빈도의 등재해도 스펙트럼이 요구되고 있다. 확률론적 방법을 적용하여 국내 주요 5개 도시에 대해 등재해도 스펙트럼(uniform hazard spectrum)을 분석하였다. 지진 및 지체구조 관련된 전문가 패널은 10인이며, 전문가 패널이 제시한 다수의 지진지체구조구 모델 및 다양한 지진동 감쇠식을 적용하였다. 분석대상 진동수는 (0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0) Hz이고 또한 PGA(최대지반가속도) 결과를 이용하여 500년, 1,000년 및 2,500년 등 3개 주요 성능기준에 해당하는 재현주기에 대해 등재해도 스펙트럼을 분석하였다. 민감도 분석에 의하면 지진지체구조구 모델 변수보다 지반진동 감쇠식 변수가 지진재해도에 보다 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다. 일반적으로 등재해도 스펙트럼은 10 Hz에서 최대 지진재해도를 보여 주었고, 기존 연구 및 관련 기술기준에 제시된 등재해도 스펙트럼의 수준 및 모양 특성과 대단히 유사하였다.

ABSTRACT

Since the Northridge earthquake (1994) and Kobe earthquake (1995), the concept of performance-based design has been actively introduced to design major structures and buildings. Recently, the seismic design code was established for fire protection facilities. Therefore, the important fire protection facilities should be designed and constructed according to the seismic design code. Accordingly, uniform hazard spectra (UHS), with annual exceedance probabilities, corresponding to the performance level, such as operational, immediate occupancy, life safety, and collapse prevention, are required for performance-based design. Using the method of probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), the uniform hazard spectra for 5 major cities in Korea with a recurrence period of 500, 1,000, and 2,500 years corresponding to frequencies of (0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0)Hz and PGA, were analyzed. The expert panel was comprised of 10 members in seismology and tectonics. The ground motion prediction equations and several seismo tectonic models suggested by 10 expert panel members in seismology and tectonics were used as the input data for uniform hazard spectrum analysis. According to sensitivity analysis, the parameter of spectral ground motion prediction equations has a greater impact on the seismic hazard than seismotectonic models. The resulting uniform hazard spectra showed maximum values of the seismic hazard at a frequency of 10Hz and also showed the shape characteristics, which are similar to previous studies and related technical guides for nuclear facilities.

Keywords : Ground motion prediction equation, Performance-based design, Probabilistic seismic hazard analysis, Seismotectonic model, Uniform hazard spectra

1. 서 론

내진설계 개념은 지진재해로부터 인명 및 구조물, 건축물을 보호하기 위한 것이다. 설계응답스펙트럼이 내진설계 시 가장 기본적 요소이며 초기에는 주로 표준 설계응답스펙트럼의 형태로 제시되었다. 원자력 발전소 및 관련

† Corresponding Author, E-Mail: sobang1961@gmail.com, TEL: +82-43-649-1320, FAX: +82-43-649-1787
Copyright ⓒ 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

구조물의 내진설계 시 적용되는 Regulatory Guide 1.60 (USNRC, 1973)[1]이 제시한 표준 설계응답스펙트럼이 대표적인 예이다.

최근 건축물 및 각종 시설물의 설계를 할 때 성능기반 설계개념이 적극적으로 도입되었고, 따라서 구조물 및 건축물의 성능에 적합한 연발생빈도의 등재해도 스펙트럼 (Uniform Hazard Spectrum, UHS)이 적용되고 있다. 국내 내진설계와 관련 법령 중에서 성능설계와 관련된 법규를 보면 지진재해대책법 시행령 제4장 내진대책 중에서 제10조의 2(내진설계기준 공통적용사항)에서 기능수행, 즉시복구, 인명보호, 붕괴방지 등 단계별 국가 내진성능의 목표를 설정하도록 명시하고 있다.

특히 원전 내진분야는 Reg. Guide 1.208[2] 기술기준에 성능기반 설계기법이 도입되면서 설계 지반운동으로서 연간 10^{-5} 발생 확률에 해당하는 등재해도 스펙트럼이 적용되고 있다. 또한 ASCE 43-5 (US AEC, 2007)[3]에서도 수평 및 수직성분 설계요소(DF) 등을 적용하여 등재해도 스펙트럼을 규정하고 있다.

물론 국내 소방시설에 대해서도 성능설계 개념이 점진적으로 도입되고 있다. 최근(2016년) 국내 소방시설에 대해서 역시 「화재예방, 소방시설 설치. 유지 및 안전관리에 관한 법률」의 제9조 2항에 따라서 「소방시설의 내진설계기준」(국민안전처 고시)이 제시되어 2016년 1월 25일부터 적용되고 있다. 따라서 옥내소화전설비, 스프링클러설비, 및 물분무 등을 포함하는 소화설비가 해당 및 상위 기준에서 정하는 규정에 따라 적합하게 설치되어야 한다. 하지만 소방시설의 내진설계기준(국민안전처 고시)에서 소방시설에 적합한 성능설계를 위해 요구되는 적절한 설계성능수준이 아직 구체적으로 제시되지 못하고 있어 향후 소방시설에 성능수준과 관련된 연구가 필요한 것으로 보인다. 1995년 발생한 일본 코베지진은 지진의 직접적 피해보다 도시 전체의 일주일 동안 화재로 인한 피해가 보다 심각하여 주요 소방시설에 대한 내진성능설계가 중요함을 제시하는 가장 적절한 교훈이다.

국내의 경우 설계지반운동은 주로 암반 노두(국내의 경우 S_B로 정의)에서 정의되고 있다. 국내 건축기준은 미국 Uniform Building Code (1997)[4] 기준을 준용하며 PGA (최대지반가속도, 이하 PGA라 표기)를 사용하여 왔으나 최근 2016년에 다시 개정되었다. 미국은 단주기 영역(주기 T=0.2초)과 중장주기 영역 (주기 T=1.0초)의 스펙트럴 가속도 설계응답스펙트럼을 주로 적용하고 있다(International Building Code, 2000)[5].

최근 경주지진(Mw=5.4) 발생으로 지진재해에 사회적 관심이 극대화 되었고, 그에 따라 다양한 방법을 이용하여 지진재해에 대비하는 필요성이 대두되었다. 국내 지진발생 특성을 적절하게 반영되어야 하며 또한 성능기반 설계를 위해 다양한 재해주기에 대한 지진재해도가 필요하다. 하지만 국내에서 관측된 강지진동의 부재 등으로 인하여 지진재해 분석 시 불확실성이 커다는 단점이 있어 확률론적 지진재해도 분석 기술을 적용하여 등재해도 스펙트럼을 분석하였다. 확률론적 지진재해도 분석은 Cornell (1968)[6]에 의해서 최초로 제안된 후 이후 많은 수정과 보완을 거쳐서 현재 세계적으로 가장 널리 사용되는 방법이다. 지진재해도 분석은 지진원, 지진파 감쇠식 및 부지 증폭 특성의 불확실성을 고려하여 특정 기간 및 특정 수준 이상의 지반진동이 부지에 발생할 확률을 분석하고 지진의 재현주기 또는 연간초과확률에 대해 설계지반운동 수준을 제시한다. 지진재해 분석은 하부 지반이 암반이 아닌 경우, 부지증폭 특성을 고려하여 설계응답스펙트럼을 수정하여야 한다.

10인의 지진 및 지반진동 감쇠식 전문가 패널이 제시한 2가지 종류의 입력자료를 이용하였다. 국내 및 국외에서 개발된 스펙트럴 지반진동 감쇠식과 다양한 국내 지진지체구조구(Seismotectonic Province) 모델을 사용하여 인구 및 산업 밀집도가 높은 5개 주요 도시에 대해 확률론적 지진재해도 분석을 수행하였다.

기존 연구(Kim et al., 2016)[7]에서 지적된 특히 저진동수에서 특이한 이상값 등을 해결하기 위해 본 연구는 수차례의 피드백 과정을 수행하였다. 따라서 기존 연구에 대비할 때 가장 커다란 차이점은 새로이 전문가 패널과 수차례의 피드백 과정을 수행하였고 이를 통해 지진재해도를 재분석하여 새로이 등재해도를 제시하였다.

소방시설 및 건축물의 주요 공명주파수에 해당하는 (0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0) Hz 및 PGA에 대해 확률론적 방법을 이용하였고, 주요 소방시설의 성능기반설계 범위를 대부분을 포괄하기 위해 500년, 1,000년, 및 2,500년을 포함한 주요 3개 재래주기에 대해 등재해도 스펙트럼을 분석하였다. 소방시설의 내진설계기준에 해당하는 국민안전처 고시는 구체적으로 제시된 소방시설에 적합한 성능설계를 위해 요구되는 구조물 및 건축물 종류에 따라서 기능수행, 즉시복구, 인명보호, 붕괴방지와 같은 적절한 설계성능수준을 아직 제시하지 않고 있다.

본 연구는 가장 심각한 설계성능수준인 붕괴방지 (Collapse Prevention)에 해당하는 4,800년 재현주기를 제외하고 단지 500년, 1,000년, 및 2,500년을 포함한 주요 3개 재래주기에 대해 등재해도 스펙트럼을 분석하여 제시하였다. 향후 구체적으로 제시된 소방시설의 성능설계를 위해 요구되는 최대 성능수준이 정의되면 해당되는 적절한 재현주기를 다시 포함시킬 필요가 있다. 미국의 경우 소방시설이 아닌 일반구조물의 성능수준을 고려하여 PGA 및 국가지진재해도 역시 500년, 1,000년, 및 2,500년의 3개 재현주기에 대해 제시하고 있다. 기존의 연구(Hahm, 2012; Kim et al., 2016)[8,7]와 비교하였다.

2. 확률론적 지진재해도 분석

확률론적 지진재해도 방법을 이용하여 임의 특정 부지

또는 국내 전체 지역을 대상으로 발생 가능한 모든 지진에 대해 지진규모와 진앙거리를 고려하여 계산된 임의 지반진동 수준에 대한 연초과확률(Annual Exceedance Probability)을 분석한다. 지진재해도 분석을 위해 크게 3 종류의 입력변수가 사용되며, 입력변수는 지진자료가 가지는 필연적인 불확실성을 가지고 있다. 확률론적 지진재해도 분석에서는 입력변수들의 불확실성을 효과적으로 반영하기 위하여 일반적으로 논리수목(Logic Tree)을 이용하여 지진재해도 분석을 수행한다.

확률론적 지진재해도 분석은 우선 면적 지진원을 일정한 크기를 가진 격자로 분할한 후, 각 격자의 지진활동도(Seismicity)를 분석한다. 아직 단층과 같은 국내 선 지진원에 대한 불확실성이 높기 때문에 면적 지진원만을 고려하였다. 지진활동도는 식 (1)에 제시된 Gutenberg-Richter (1944)[9] 관계식의 변수들로 정의된다.

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

식 (1)에서, M은 지진규모, N은 지진규모 M을 초과하는 지진의 단위 면적에 대해 그리고 연간 발생 개수다. 또한 a와 b는 G-R 상수이며, 각각 지진규모 및 지진 누적발생횟수 관계곡선의 절편과 기울기를 의미한다.

임의 지역에서 미래 발생할 지진에 의한 지반진동의 크기를 분석하기 위해서 지반진동 감쇠식(Ground Motion Prediction Equation; GMPE)이 필요하고 지반진동 감쇠식은 PGA 또는 스펙트럴 가속도(Spectral Acceleration)를 지진규모와 진앙거리의 함수로 나타낸다. 10인의 전문가가 제시한 지진지체구조 모델 내부의 모든 격자 각각의 지진활동도 변수 및 지반진동 감쇠공식을 이용하여 각각 분석대상 위치에서 특정한 설계지반운동 값의 연초과확률을 계산한다.

전문가 10인이 제시한 지진지체구조구 모델은 대부분 한 개 또는 몇 개의 보다 작은 면적 지진원 지역으로 구성되어 있다. 작은 면적 지진원 지역을 위도 및 경도 각각 0.1° 격자로 나누어 각 격자에 해당되는 a, b, 최대지진 및 최소지진 값을 분석하여 할당한다. 분석하고자 하는 격자 모서리 위치 각각에서 모든 면적 지진원으로부터 지진재해도를 계산하여 합쳐 나가는 과정으로 이루어져 있다.

3. 지진 입력자료

3.1 국내 개발 지진카타로그

각각 지진지체구조구 모델에서 a, b, 최대지진값, 최소지진값을 계산 및 분석을 위해 지진카타로그의 신뢰성을 고려하여 10인의 전문가는 현재 가용한 지진카타로그인 Lee and Yang (2006)[9], 기상청(2012)[10] 또는 한국지질자원연구원(2014)[11] 등 3종류의 지진카타로그중에서 단수 또는 복수로 조합하여 제시하였다.

3.2 지진지체구조구 모델(면적 지진원 모델)

10인 전문가가 각각 제시한 다양한 지진지체구조구 모델을 사용하여 지진재해도 분석을 수행하였다. 다수의 전문가는 이미 개발되어 있는 기존의 지진지체구조구 모델을 단수 또는 복수로 선택하여 제시하였고, 일부 전문가는 전문가 자신이 개발한 고유의 지진지체구조구 모델을 제시하였다.

3.3 a, b, 최대지진 및 최소지진값

10인의 전문가가 제시한 지진지체구조구 모델 각각에 대해 지진카타로그의 완성도(Completeness)를 고려하여, 역사지진 전체, 조선시대, 고려시대, 삼국시대 및 1903 이후 관측된 계기지진 자료 등 관측기간에 따라 다른 가중치를 제시하였다. 제시한 지진카타로그의 시대별 가중치를 활용하여 a, b, 최대지진 및 최소지진값을 분석하였다. 임의 전문가가 제시한 입력자료 예는 Table 3에 제시되어 있다.

3.4 지반진동 감쇠식 모델

10인 전문가 각각은 다양한 지반진동 감쇠식 모델을 가중치와 함께 제시하였고 이를 입력자료로 사용하여 지진재해도 분석을 수행하였다. 일부 전문가는 주로 미국 중동부 지역에서 개발된 모델 등(Abrahamson and Silva, 2008; Campbell, 2003; Atkinson and Boore, 1997; Toro et al. 1997; Atkinson & Silva, 2000; Boor and Atkinson, 2008; Boore and Atkinson, 2011)[12,13,14,15,16,17,18]을 조합하여 제시하였고, 일부 전문가는 국내에서 개발된 지진동 감쇠모델 (Noh and Lee, 1995; Lee, 2002; Jo and Baag, 2003; Yun et. al., 2005)[19,20,21,22] 등과 미국 중동부 지역에서 개발된 모델을 복수로 조합하여 제시하였다. 국내에 적합한 지반진동 감쇠 특성은 지질구조 활동이 활발한 미국 서부 지역 보다 상대적으로 안정된 미국 중동부과 유사하다고 알려져 있다 (Abrahamson and Silva, 2008)[12].

지진재해도는 사용된 지반진동 감쇠식 모델을 고려하여 NEHRP B/C 지반(760 m/sec, VS30)[23]으로 정의되었다. 따라서 임의 지역의 실제 지진재해도에 적용시 하부 지반의 성질에 따라 NEHRP B/C 지반에서 정의된 지진재해도에 추가적으로 부지증폭 특성이 고려되어야 한다.

주파수별 지반진동 감쇠식 모델을 개발하기 위해 실제 관측된 다수의 강진 기록이 필요하지만, 국내처럼 6.0 이상 지진 기록이 없는 지역은 일반적으로 추계학적 모사방법을 이용하고 있다. 하지만 추계학적 모사방법을 효과적으로 적용하기 위해 국내 관측소 지반에 대한 상세 정보, 규모 5.0 이상의 강지진동 관측자료 부족, 관측된 지반진동의 진앙거리의 범위, 관측 지역의 제한성 등 다수의 문제점이 존재하기 때문에 감쇠식의 불확실성 대단히 크다.

확률론적 지진재해도 분석은 지진원 및 지진동 감쇠식 등을 포함하여 다양한 종류의 입력변수가 사용되기 때문에 각 입력변수가 지진재해도에 미치는 영향을 민감도 분석을

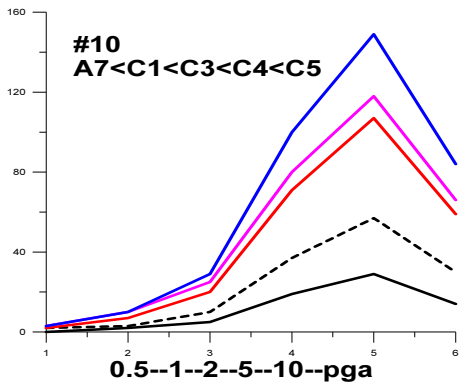

Figure 1. Sensitivity of maximum seismic hazard values for five seismotectonic models (C5, C4, C3, C1, & A7) at the given GMPE model #10 and at 0.5, 1, 2, 5, 10 Hz & PGA.

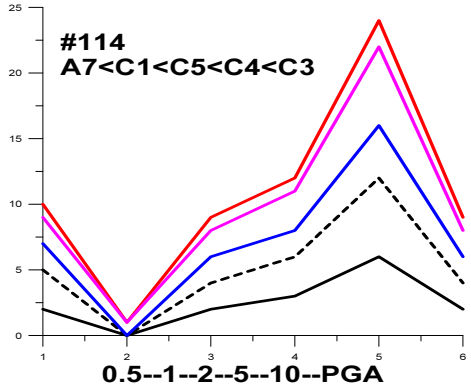

Figure 2. Sensitivity of maximum seismic hazard values for five seismotectonic models (C5, C4, C3, C1, & A7) at the given GMPE model #114 and at 0.5, 1, 2, 5, 10 Hz & PGA.

Table 1. 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 kappa and Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southeastern Korea. EESK J. 7(6), 59-70, 2003.	

통해 결과값의 신뢰성을 검증할 필요가 있다. 일반적으로 민감도 분석은 가중치를 가지고 제시된 다양한 지진관련 입력변수 중에서 일부 변수들을 고정시키고 하나의 변수만을 변화시키며 결과를 분석한다.

4. 민감도 분석

4.1 지진지체구조구 모델 민감도 분석

10인의 전문가 각각은 지진지체구조구 모델을 가중치와 함께 복수로 조합하여 제시하였고 제시된 모델 중 가장 제시 빈도가 높은 지진지체구조구 모델(A7, C1, C3, C4 및 C5) 등 5개 모델을 선택하여 영향을 분석하였다. 국내 특정 지점의 지진재해도가 아닌 국내 전체지역의 지진재해도중에 최대 지진재해도를 선택하였다. 우선 감쇠식 모델을 고정하고 5개 종류의 지진지체구조구 모델 변화에 대한 재현주기 1,000년에 해당하는 지진재해도를 분석하였다.

하나의 지진지체구조구 모델이 선택되면 모델에서 제시된 면적 지진원 각각에 대해 a, b, 최대지진 및 최소지진값이 분석된다. 다음 단계에서 지진재해도 분석을 위해 감쇠식이 필요하며 10인 전문가가 제시한 감쇠식은 각각 전문가마다 각각 다르나 약 3개에서 4개 종류이며 상호 중복되는 경우도 있다. 일부 전문가들은 미국 중동부에서 개발된 다수의 감쇠식을 주로 제시하였고 다른 일부 전문가는 국내에서 개발된 감쇠식과 미국 중동부에서 개발된 감쇠식을 혼합하여 제시하였다. 본 절에서 민감도 분석을 위해 제시 빈도가 가장 높은 감쇠식(#8 및 #10; Table 1)을 이용하였다.

Figure 1은 감쇠식 #10 (Table 1)을 고정하고 5개 지진지체구조구 모델에 대해 재현주기 1,000년에 해당하는 등재해도를 분석하였다. 가로축은 진동수를 나타내고 세로축은 지진재해도를 나타낸다. 감쇠식 #10은 미국 중동부에서 개발된 다수의 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 PGA에서 지진재해도가 수렴되고 있다.

C5일 경우 가장 크고, C4, C3, C1 및 A7의 지진지체구조구 모델 순서로 지진재해도 크기가 차례로 감소하고 기존 연구(Hahm, 2012; Kim et al., 2016)[8,7] 및 다양한 지진재해도 기술기준 등에 제시된 등재해도 스펙트럼 모양 특성과 부합하는 형태를 보여주고 있다. 특히 10 Hz에서 지진재해도는 A7 및 C5에서 각각 약 20 %g 및 약 80 %g이며 차이는 60 %g를 보여주고 있어 다른 진동수에 비해 가장 커다란 차이를 보여준다.

Figure 2는 #114 감쇠식을 고정하고 등재해도를 분석하

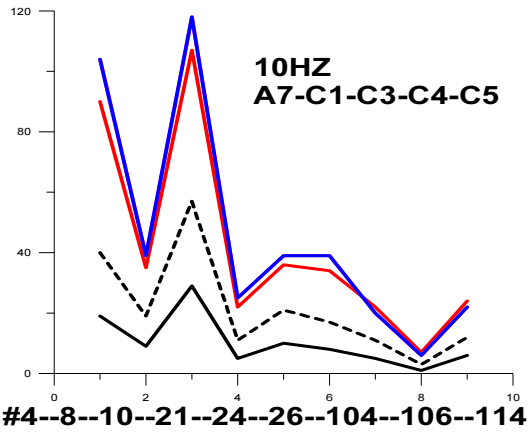

Figure 3. Sensitivity of maximum seismic hazard values (10 Hz) for 5 seismotectonic models (C5, C4, C3, C1, & A7) at the given GMPE model #10 and at #4, #8, #10, #21, #24, #26, #104, #106, & #114.

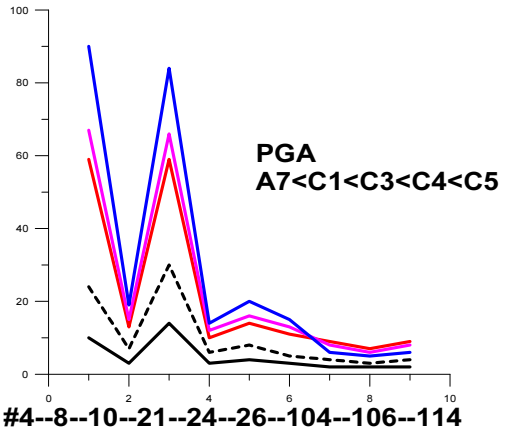

Figure 4. Sensitivity of maximum seismic hazard values (PGA) for 5 seismotectonic models (C5, C4, C3, C1, & A7) at the given GMPE model #10 and at #4, #8, #10, #21, #24, #26, #104, #106, & #114.

였다. #114는 국내에서 관측된 지반진동을 이용하여 개발된 다수의 감쇠식 가운데 하나이다. 1 Hz에서 재해도값이 거의 영에 가깝고 0.5 Hz에서의 재해도가 1 Hz 보다 훨씬 크고 1 Hz부터 고진동수로 이동할수록 재해도가 감쇠식 상호간에는 서로 거의 평행하게 서서히 증가하고 있다. 이후 10 Hz에서 최대를 이루고 다시 감소하여 PGA값으로 수렴되고 있다.

가장 높은 지진지체구조구 모델은 C3이고 C4, C5, C1, A7 순서대로 감소하고 있다. 기존 연구(Hahm, 2012; Kim et al., 2016)[8,7] 및 다양한 기술기준 등에서 제시된 등재해도 스펙트럼 모양 특성으로부터 특히 가장 저진동수인 0.5 Hz에서 다소 벗어난 형태를 보여주고 있다. 그리고 10 Hz에서 지진재해도는 A7 및 C3에서 각각 6 %g 및 28 %g이며 약 22 %g의 차이를 보여준다.

4.2 지진지체구조구 모델 및 감쇠식의 민감도 분석

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

Figure 3은 재현주기 1,000년에 대한 등재해도이다. 진동수를 10 Hz로 고정하고 지진지체구조구 모델 및 감쇠식의 민감도를 동시에 분석한 결과를 보여 주고 있다. #4, #8, #10, #21, #24, 및 #26 감쇠식은 미국 중동부에서 개발된 감쇠식에 해당되고 #104, #106, 및 #114 감쇠식은 국내 관측 지반진동으로부터 개발된 감쇠식이다. 가로축은 감쇠식의 종류를 나타내고 세로축은 지진지체구조구 모델(C5;푸른 실선, C4;붉은 실선, C3;검정 실선 및 A7;검정 파쇄선) 각각에 따라 지진재해도를 나타낸다.

공통적으로 지진지체구조구 모델과 관계없이 #10의 감쇠식을 사용할 경우가 최대값을, 그리고 #4, #8, #24, #21, #26 감쇠식의 순서로 감소되는 값을 보여주고 있다. 또한 각각의 감쇠식에서 C5, C4, C3 및 A7의 순서로 지진재해도 크기가 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 특성은 Figure 1에서 제시된 지진재해도 크기의 순서 특성과 일치하고 있음을 보여 준다.

#10의 감쇠식의 경우 지진지체구조구 모델 상호간의 최대 및 최고값의 차이가 가장 크게 나타나고 있다. 지진재해도가 가장 큰 C5 모델은 최대값이 약 120 %g이고, 최소값인 A7 모델은 약 25 %g이다. 따라서 약 95 %g의 차이를 보여 주고 있다. 또한 C5 모델에 대해 감쇠식모델 상호간의 변화의 폭이 가장 크다. #10의 감쇠식에 대해 약 120 %g이고 #106의 감쇠식은 최소값 약 5 %g을 보여주고 있어 약 105 %g의 차이를 보여 주고 있다.

따라서 지진지체구조구 모델 변화에 대한 지진재해도의 최대 차이는 약 95 %g를 보여 주었고 감쇠식 변화에 대한 지진재해도의 최대 차이는 약 105 %g의 차이를 보여 주고 있어 감쇠식 변화에 대한 지진재해도 차이가 더욱 크게 발생하고 있어 민감도다 높다는 것을 보여주고 있다.

Figure 4는 PGA(최대지반가속도)로 고정하고 지진지체구조구 모델 및 감쇠식의 민감도를 동시 분석한 결과를 보여 주고 있다. 각각의 주어진 감쇠식에서 C5, C4, C3, C1 및 A7의 순서로 지진재해도가 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 특성은 Figure 1에서 제시된 지진재해도 크기 순서 특성과 일치하고 있음을 보여 준다. 지진지체구조구 모델에 관계없이 공통적으로 #10과 #4 감쇠식을 사용할 경우 거의 같은 크기의 최대값을, 그리고 #8, #24, #21, #26 감쇠식의 순서로 감소되는 특성을 보여주고 있다.

특히 #10의 감쇠식으로 고정한 경우, 지진지채구조구 모델 상호간의 최대 및 최저값의 차이가 가장 크게 나타나고 있다. 최대값을 나타내는 C5 모델은 약 82 %g이고 최소값 A7 모델은 약 15 %g이며 약 67 %g의 차이를 보여 주고 있

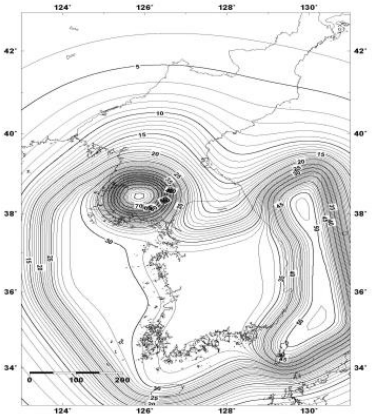

Figure 5. Distribution map of seismic hazard values to Mmax (Mw=7.5).

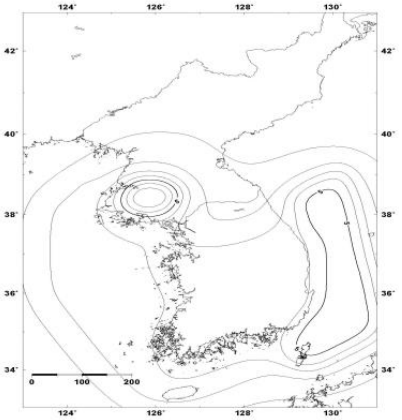

Figure 6. Distribution map of seismic hazard values to Mmax (Mw=6.4).

다. 또한 감쇠식에 따라 가장 변화의 폭이 큰 C5 모델에 대해 #10의 감쇠식을 사용한 경우 약 82 %g이고 #106의 감쇠식의 경우 최소값 약 5 %g을 보여주고 있어 약 77 %g의 차이를 보여 주고 있다.

따라서 지진지체구조구 모델 변화에 대한 지진재해도의 최대 차이는 약 67 %g를 보여 주었고 감쇠식 변화에 대한 지진재해도의 최대 차이는 약 77 %g의 차이를 보여 주고 있어 감쇠식 변화에 대한 지진재해도의 차이가 더욱 크게 발생하고 있다. Figure 3 및 Figure 4의 경우 모두 공통적으로 지진지체구조 모델 보다 감쇠식의 변화가 지진재해도에 보다 커다란 변화를 발생시키고 있어 민감도가 더욱 커다는 것을 보여 주었다. 지반진동 감쇠식의 영향에 대해서 (Silva et al., 1999)[24]가 이미 제시하였다

4.3 최대지진값 민감도 분석

10인의 전문가가 각각 최대지진값을 복수로 조합하여 가중치와 함께 제시하였고 이중에서 임의 전문가를 선택하여 민감도 분석을 수행하였다. 임의 전문가가 제시한 입력변수 가운데 지진원 변수(a, b, 및 최소지진 규모) 및 지진지체구조구 모델을 고정하고 최대지진값의 변화에 대한 재현주기 1,000년에 해당하는 지진재해도를 분석하였다.

Figure 5 및 6은 최대지진값을 7.5 (Mw) 및 6.4 (Mw)로 각각 고정하고 분석한 지진재해도 분포를 보여 주고 있다. 2가지 경우 모두 황해도 지역이 최대값을 공통적으로 보여주었다. 전체적으로 지진재해도 경향은 유사하나 최대값은 최대규모 7.5일 때 37 %g, 최대규모 6.4일 경우 7 %g로 커다란 차이를 보여주고 있어 규모에 따른 영향을 잘 보여주고 있다. 규모가 7.5일 경우 상대적으로 지진재해도 절대값이 높을 뿐만 아니라 지진재해도의 경사가 대단히 급한 특징을 보여주고 있다.

4.4 입력자료의 feedback 과정

감쇠식의 경우 미국 중동부에서 적용되는 감쇠식 보다 국내에서 개발된 일부 감쇠식을 이용한 결과는 국내 지진지체구조구 특성을 대표한다고 할 수 있다. 하지만 국내에서 개발된 일부 감쇠식을 이용한 결과는 일반적으로 기존의 외국 보고서 등에서 제시된 전형적인 형태의 등재해도 스펙트럼 모양에서 다소 벗어나 있다고 기존 연구(Kim et al., 2016)[7]에서 지적되었다. 따라서 전문가에게 해당 분석결과를 제시하고 각각 전문가가 기존의 감쇠식을 변경하거나 기중치 조정을 거치는 피드백 과정을 여러 차례 수행하였다.

입력자료를 설정하는 단계에서 불확실성을 감소시키기 위해 위에서 시도된 피드백 과정은 미국 원자력위원회가 원자력관련 구조물의 인허가 과정에서 적용되는 기술기준인 SSHAC (US NRC, 2012)[25]에 명시되어 있으며 또한 의무적으로 적용하도록 하는 중요 사항이다.

확률론적 지진재해도의 불확실성을 감소시키고 또한 불확실성을 정량화하는 목적을 위해 SSHAC (US NRC, 2012)[25] 과정이 개발되었고, 모두 4개의 수준이 있으며 최근 건설되는 원자력 구조물에 대해 미국 원자력 위원회는 적어도 3수준 이상을 요구하고 있다. 국내에서도 최근 SSHAC (US NRC, 2012)[25] 과정이 시범적으로 수행되는 것으로 알려져 있다.

5. 등재해도 스펙트럼 분석

5개 주요 도시 지점에서 그리고 각각의 지점에서 3개의 재현주기(500년, 1,000년 및 2,500년)와 주요 진동수 0.5, 1, 2, 5, 10 Hz에서 지진재해도 및 PGA를 계산하여 Figure 7 ~Figure 11에 제시하였다. 가로축은 진동수를 나타내고 세로축은 지진재해도를 나타낸다. 앞서 제시한 바와같이 PGA 재해도는 영주기 가속도(Zero Period Acceleration, ZPA)와 관련되기 때문에 무한대 진동수에 해당하나 일반적으로 타 연구의 일반적인 표기를 따라서 그래프의 100.0 Hz 부분에 표시하였다. 옥내소화전설비, 스프링클러설비, 및 물분무설

Table 2. An Example of Input Parameters for PSHA for Expert Panel #2

Source map type (Weight)	SOURCE ZONE	Era (Weight)	Period (yr)	A value	B value	M_{max}	M_{min}	GMPE (Weight)
C3 (0.4)	S1	Chosun Dynasty(0.5)	1392-1810	3.04	0.62	6.5	3.5	Atkinson & Silva (2000)(0.3) Jo & Baag (2003)(0.4) Boore & Atkinson (2011)(0.3)
	S1	Instrumental(0.5)	1905-2013	5.22	1.12	6.5	3.5	
	S2	Chosun Dynasty(0.5)	1392-1810	5.48	1.01	6.5	3.5	
	S2	Instrumental(0.5)	1905-2013	4.48	0.74	6.5	3.5	
	S3	Chosun Dynasty (0.5)	1392-1810	4.60	0.84	6.5	3.5	
	S3	Instrumental(0.5)	1905-2013	5.87	1.35	6.5	3.5	
	S4	Chosun Dynasty(0.5)	1392-1810	6.03	1.01	6.5	3.5	
	S4	Instrumental(0.5)	1905-2013	4.43	0.76	6.5	3.5	
C1 (0.6)	S1	Chosun Dynasty(0.5)	1392-1810	6.01	0.97	6.5	3.5	
	S1	Instrumental(0.5)	1905-2013	4.83	0.72	6.5	3.5	

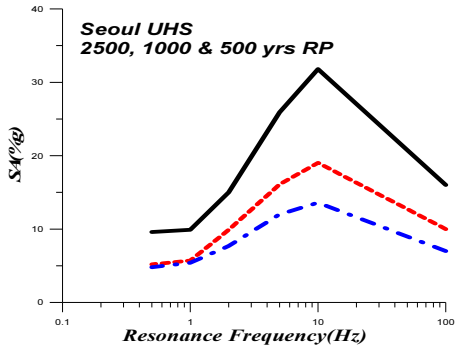

Figure 7. Uniform hazard spectrum for RP (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Seoul.

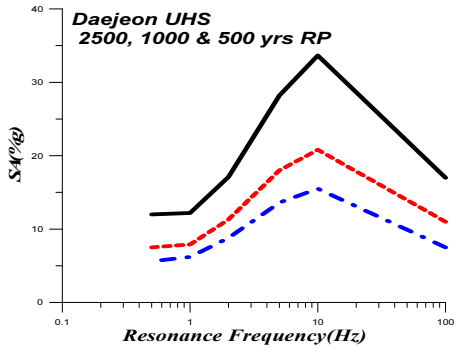

Figure 8. Uniform hazard spectrum for RP (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Daejeon.

Table 3. Seismic Hazard at Seoul, Daejeon, and Daegu (unit ; %g)

City	Seoul			Daejeon			Daegu			Remarks
Hz\RP	2,500	1,000	500	2,500	1,000	500	2,500	1,000	500	
PGA	17.4	11.5	8.3	18.5	12.5	8.8	20.6	13.0	9.4	
10.0	34.8	22.1	16.1	36.5	23.7	18.3	37.0	23.6	17.8	
5.0	27.9	17.7	14.3	27.9	19.7	15.2	30.3	19.6	15.0	
2.0	16.5	11.4	9.2	18.6	12.8	10.1	18.6	12.5	10.0	
1.0	11.3	7.1	6.8	13.4	9.1	7.5	13.1	9.0	7.3	
0.5	9.7	5.3	6.2	12.0	7.6	5.6	11.0	7.3	5.5	

비 등을 포함하는 주요 소방시설물의 내진설계성능을 고려할 때 가장 빈번하게 적용될 가능성이 높은 500년(2.0E-03 /yr), 1000년(1.0E-03/yr), 및 2500년(4.0E-04 /yr)의 재현주기에 해당하는 지진재해도를 이용하여 등재해도 스펙트럼을 분석하였다.

Figure 7은 서울 지역의 재현주기 500년, 1,000년, 및 2,500년에 대한 등재해도를 나타내고 있다. 재현주기가 증가할수록 지진재해도가 점차적으로 크게 나타나고 있다. 구체적인 지진재해도는 Table 3에 제시되어 있다. 3개 등재해도 스펙트럼 공통적으로 출발점인 0.5 Hz에서 가장 작고 높은 진동수로 진행하면서 지진재해도가 서로 거의 평행하게 서서히 증가하다가 10 Hz에서 최대값을 보여 주고 있다. 이를 정점으로 다시 감소하여 PGA값(10 Hz에서 지진재해도의 약 1/2)으로 수렴되고 있다. 또한 기존 연구(Hahm, 2012; Kim et al., 2016)[8,7]의 서울지역과 결과와 비교할 때 전체 관심 진동수 및 PGA에서 미세하게 높은 값을 보여주고 있다.

대전 지역의 3개 등재해도스펙트럼은 Figure 8에 제시

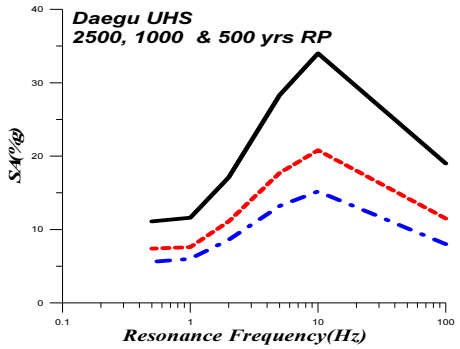

Figure 9. Uniform hazard spectrum for RP (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Daegu.

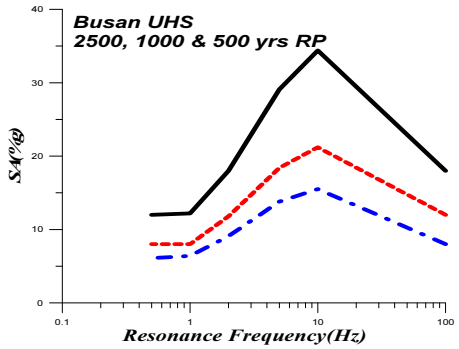

Figure 10. Uniform hazard spectrum for RP (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Busan.

되어 있다. 서울 지역과 유사하게 재현주기가 증가에 따라 10 Hz에서 최대값을 이루고, 다시 감소하여 PGA값으로 수렴되고 있다. 구체적인 지진재해도는 역시 Table 3에 제시되어 있다. PGA값은 500년, 1,000년, 및 2,500년에 대해 각각 0.088 g, 0.125 g, 및 0.185 g이고 해당 재현주기 각각에서 서울지역보다 미세하게 높은 재해도를 보여주고 있다. 기존 연구(Kim et al., 2016)[7]와 비교할 때 모양 특성 및 미세하게 높은 값을 보이는 점은 서울지역 결과와 유사하다.

Figure 9는 대구 지역의 등재해도 스펙트럼이며. 앞선 2개 지역과 유사하게 재현주기가 증가할 때 10 Hz에서 최대를 이루고 다시 감소하여 PGA값으로 수렴되고 있는 있다. PGA는 Table 3에서 제시된 바와 같이 500년, 1,000년, 및 2,500년에 대한 각각 0.093 g, 0.135 g 및 0.206 g이고 해당 재현주기에서 5개 도시 가운데 가장 높은 재해도를 보여주고 있다. 대구지역이 최대값을 보여 주고 있고 이러한 특징은 기존 연구(KIGAM, 2012; Hahm, 2012; Kim et al., 2016)[26,8,7] 보고서에서도 제시된 바가 있다. 기존연구와 대비하여 모양 특성 및 미세하게 높은 값을 보이는 점은 서울지역 결과와 유사하다.

부산 지역의 결과는 Figure 10에 제시되었고, 저진동수 0.5 Hz에서 값이 가장 작고, 점차적으로 지진재해도가 진동수와 함께 증가하여 10 Hz에서 최대를 이루고 다시 감소하여 PGA로 수렴되고 있다. 이러한 특징은 앞선 3개 지역과 대단히 유사하다. 특히 PGA는 Table 4에서 제시되어 있고,

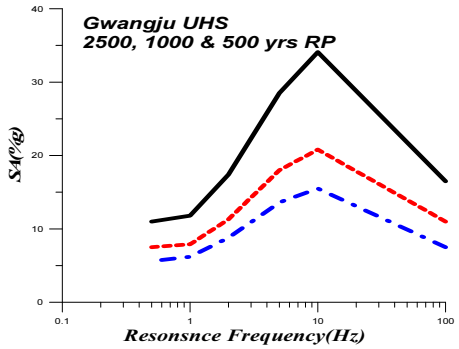

Figure 11. Uniform hazard spectrum for RP (500, 1,000 and 2,500 yrs) at Gwangju.

500년, 1,000년, 및 2,500년에 대해 각각 0.093 g, 0.135 g 및 0.195 g를 보여 주고 있다.

Figure 11은 광주 지역의 등재해도 스펙트럼이며 PGA 재해도는 Table 4에서 제시된 바와같이 500년, 1,000년, 및 2,500년에 대한 PGA는 각각 0.09 g, 0.118 g 및 0.18 g이다.

2,500년 재현주기에 해당하는 PGA를 기준으로 할 경우 대구의 지진재해도가 상대적으로 가장 크고 부산, 대전, 광주 및 서울의 순서를 보여주고 있다. 또한 2,500년 재현주기에 해당하는 10 Hz를 기준으로 할 경우 PGA와 다르게 부산의 지진재해도가 상대적으로 가장 크고 대구, 광주, 대전 및 서울의 순서를 보여주고 있다. PGA 및 10 Hz 모두

Table 4. Seismic Hazard at Busan and Gwangju (unit;%g)

City	Busan			Gwangju			Remarks
Hz\RP	2,500	1,000	500	2,500	1,000	500	
PGA	19.5	13.5	9.3	18.0	11.8	9.0	
10.0	37.3	24.0	14.3	36.9	23.5	17.8	
5.0	31.8	20.4	16.0	30.6	20.0	15.5	
2.0	19.7	14.0	10.6	18.9	12.9	10.1	
1.0	13.6	9.5	7.8	13.1	9.0	7.4	
0.5	12.1	8.2	6.4	11.2	8.0	6.1	

기존 연구결과에서 보여준 순서와 동일하다. 또한 PGA를 기준으로 할 경우 기존의 건교부(1997)[27]에서 제시된 국가지진재해지도 특징과 유사하다.

6. 결 론

(1) 소방시설물의 내진 성능설계에 일반적으로 요구되는 3개 재현주기(500년, 1,000년, 및 2,500년)에 대해 국내 5개 주요 도시에서의 등재해도 스펙트럼을 제시하였다. 3개 재현주기 및 5개 주요 도시에 제시된 지진재해도 모두 10.0 Hz에서 최대값을 보여주었고, 재현주기가 커짐에 따라 각각 진동수에서 지진재해도가 커지는 것으로 분석되었다. 각각 등재해도 스펙트럼에서 최대값을 나타내는 10.0 Hz의 경우 2,500년, 1,000년 및 500년 재현주기 각각에 대해 5개 도시 상호간 지진재해도의 커다란 차이가 없는 것으로 분석되었다.

(2) 2,500년 재현주기에 대해 대구의 지진재해도가 상대적으로 가장 크고 부산, 대전, 광주 및 서울의 순서이며 기존의 건교부(1997)[27]가 제시한 국가지진재해지도와 비교할 때 유사한 특징을 보여주고 있다. 기존 연구(Hahm, 2012; Kim et al., 2016)[8,7]가 제시한 수준보다 본 연구에서 5개 도시의 특히 PGA 지진재해도는 미세하게 높은 값을 보여 주었다. 하지만 지진재해도 분석코드 종류 차이 및 전문가 패널의 차이 등을 고려할 때 오차 범위내의 값으로 판단된다.

(3) 지진지체구조구 모델 보다 지반진동 감쇠식 모델이 등재해도 스펙트럼에 상대적으로 더욱 큰 영향을 미치고 있음을 보여주었다. 따라서 PGA 뿐만 아니라 관심 진동수 각각에 대해 국내 지진지체구조구 특성을 대표하는 감쇠식의 개발이 대단히 중요하다. 국내 일반 지반에 대한 상세정보, 중규모 이상의 강지진동 부족, 진앙거리의 범위, 관측지역의 제한성 등을 보완할 수 있는 PGA 뿐만 아니라 진동수별 지반진동 감쇠식에 대해 보다 연구가 필요하다.

(4) 기존연구는 특히 0.5 Hz 진동수에서 일반적 등재해도 스펙트럼 형태로부터 다소 벗어나 있는 특징을 보여주었으나 본 연구 결과는 그러한 다소 완화된 특징을 보여주고 있다. 이러한 현상은 지반진동 감쇠식의 차이에 의한 것으로 분석되었고 따라서 국내 지진지체구조특성에 적합한 지반진동 감쇠식 개발이 필요하다.

후 기

이 논문은 2014학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

References

1. U.S. NRC, “Design response spectra for seismic design of nuclear power plants”, Revision 1, Regulatory Guide 1.60, U.S. Atomic Energy Commission, Washington (1973).
2. U.S. NRC, “A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion”, Regulatory Guide 1.208, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington (2007).
3. U.S. AEC, “Evaluation of the seismic design criteria in ASCE/SEI standard 43-05 for application to nuclear power plants”, NUREG/CR-6926 (2007).
4. ICBO, “1997 Uniform Building Code”, Volume 2-Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials (1997).
5. International Code Council, International Building Code (2000).
6. C. A. Cornell, “Engineering seismic risk analysis”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606 (1968).
7. J. K. Kim, S. W. Wee and J. B. Kyung, “Uniform Hazard Spectra of 5 Major Cities in Korea”, J. Korean Earth Sci. Soc., Vol. 37, No. 3, pp. 162-172 (2016).
8. D. G. Hahm, J. M. Seo, I. K. Choi and H. M. Rhee, “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, Vol. 16, No. 3, pp. 35-42 (2012).
9. B. Gutenberg and C. F. Richter, “Frequency of Earthquakes in California”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34, No. 4, pp. 185-188 (1944).
10. K. Lee and W. S. Yang, “Historical seismicity of Korea”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp. 846-855 (2006).
11. KMA (Korea Meteorological Agency), “Historical earthquake records in Korea (2-1904)”, Vol. I and II (in Korean) (2012).
12. N. Abrahamson and W. Silva, “Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-motion Relations”, Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pp. 67-97 (2008).
13. C. A. Cornell, “Engineering Seismic Risk Analysis”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606 (1968).
14. G. M. Atkinson and D. M. Boore, “Some Comparisons Between Recent Ground Motion Relations”, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 24-40 (1997).
15. G. R. Toro, N. A. Abrahamson and J. F. Schneider, “Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties”, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 41-57 (1997).
16. G. M. Atkinson and W. Silva, “Stochastic Modeling of

California Ground Motions", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 90, No. 2, pp. 255-274 (2000).
17. D. M. Boore and G. M. Atkinson, "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, Vol. 24, Iss. 1, pp. 99-138 (2008).
18. D. M. Boore and G. M. Atkinson, "Modifications to Existing Ground-motion Prediction Equations in Light of New Data", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 3, pp. 1121-1135 (2011).
19. M. H. Noh and K. H. Lee, "Estimation of Peak Ground Motions in the Southeastern Part of the Korean Peninsula (II): Development of Predictive Equations", Journal of Geological Society of Korea, Vol. 31, No. 3, pp. 175-187 (1995).
20. J. M. Lee, "A Study on the Characteristics of Strong Ground Motions in Southern Korea", KINS/HR-422, Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon (2002).
21. N. D. Jo and C. E. Baag, "Estimation of Spectrum Decay Parameter and Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southeastern Korea", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 7, Iss. 6, pp. 59-70 (2003).
22. K. H. Yun, D. H. Park, W. H. Choi, C. J. Chang and D. S. Lee, "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, pp. 418-430 (2005)
23. NEHEP, "Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Building and other Structures", FEMA 302/303, part 1 (Provisions) and Part 2 (Commentary) (1997).
24. W. J. Silva, "Factors Controlling Strong Ground Motions and Their Associated Uncertainties. Seismic and Dynamic Analysis and Design Considerations for High Level Nuclear Waste Repositories", American Society of Civil Engineers, pp. 132-161 (1993).
25. U. S. NRC, "Practical Implementation Guidelines for SSHAC Level 3 and 4 Hazard Studies", NUREG-2117 (2012).
26. KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), "Active Fault Map and Seismic Hazard Map (The 3rd Year Report)", NEMA-science-2009-24, 900 p (in Korean), (2012).
27. Ministry of Construction & Transportation, "Research of Seismic Design Code (II)", Earthquake Engineering Society of Korea (in Korean) (1997).