

## 국내 원전부지 지진재해도 평가를 위한 제언

강태섭\* · 유현재

부경대학교 지구환경과학과

## Suggestion on Seismic Hazard Assessment of Nuclear Power Plant Sites in Korea

Tae-Seob Kang\* and Hyun Jae Yoo

Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

(Received: 2 April 2018 / Revised: 8 April 2018 / Accepted: 9 April 2018)

Issues with past practice in seismic hazard analysis of nuclear power plant sites in Korea are addressed. Brief review on both deterministic and probabilistic methods in seismic hazard analysis is given, and most of the continuing discussion is focussed on the probabilistic seismic hazard analysis. Causes of uncertainty are traced on the basis of the cases that the assessment methodology was applied to the nuclear power plant sites. Considerations on the assessment include the role of experts, a representative seismic catalog, seismic source zonation, earthquake ground-motion relationship, and evaluation process. Factors increasing uncertainty in each item are analyzed and some feasible solutions are discussed.

**Key words** : nuclear power plant sites, seismic hazard assessment, uncertainty, expert role, evaluation process

국내 원전부지 지진재해도 평가 경험을 바탕으로 향후 지진재해도 평가 시 보다 정량적인 평가를 위하여 고려하여야 할 사항에 대하여 점검하였다. 지진재해도 평가 방법을 양분하는 것으로 알려진 결정론적 방법과 확률론적 방법에 대하여 간단히 소개하였으며, 대부분의 후속 논의는 확률론적 지진재해도 평가에 집중하였다. 이 평가를 국내 원전부지에 적용한 과거 사례를 토대로 제기된 불확실성의 원인을 추적하였다. 확률론적 지진재해도 평가의 고려사항으로 전문가의 역할, 대표지진목록 작성, 지진원 설정, 지진-지반운동 관계식 개발 및 지진재해도 평가 절차에 대하여 토의하였다. 각 주제별로 불확실성을 증가시키는 요인을 분석하고 국내 환경에 적합한 해결 방안을 토의하였다.

**주요어** : 원전부지, 지진재해도 평가, 불확실성, 전문가 역할, 평가 절차

### 1. 서 언

지진으로 인하여 어느 지역(또는 부지)에서 발생 가능한 지반운동의 수준을 예상하는 일련의 과정을 지진재해도 평가라고 한다. 이 평가는 지진 발생 자체를 예상하는 것이 아닌 지진 발생으로 인한 효과를 가늠하고자 수행하는 것이다. 폭발이나 유발지진 등과 같

은 인위적인 활동과 연관된 제한적인 경우를 제외하면, 지진재해도 평가의 대부분은 자연지진을 그 대상으로 한다. 따라서 평가 대상 지역을 포괄하는 넓은 영역에서 조구조 운동에 따른 지진 발생 환경과 과거 자연지진 활동 특성에 대한 정확한 이해가 지진재해도 평가의 근간을 이룬다. 그러나 대부분의 경우 관찰 기간이 짧거나 측정이 불가능하기 때문에, 지진재해도 평가에

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 original work is properly cited.

\*Corresponding author: [tskang@pknu.ac.kr](mailto:tskang@pknu.ac.kr)

는 많은 가정이 전제되고 해당 지역에 고유한 특성이 아닌 일반적인 값을 사용해야 하는 경우가 많다.

우리나라에서 수행한 지진재해도 평가는 수행 주체와 대상에 따라 크게 국가 지진재해도 지도 작성을 위한 평가와 원자력발전소 및 관련 시설 부지에 대한 지진재해도 평가로 나뉠 수 있다. 일반 구조물 자체 또는 해당 부지에 대한 지진재해도 평가는 구체적으로 공개된 사례가 부족하기 때문에 이 구분에 포함하지 않았다. 그 대신 국가 지진재해도 지도 작성을 위한 평가가 원자력 관련 시설물을 제외한 일반 구조물의 지진 대응 설계 기준을 제공하기 위하여 수행되기 때문에, 지진재해도 평가 대상을 원자력 관련 시설물 부지와 이를 제외한 시설물로 구분하는 것에 큰 무리가 없는 것으로 판단할 수 있다.

원자력발전소 부지의 지진재해도 분석은 특정한 부지에 대한 지진의 영향 정도를 평가하고자 하는 목적에서 수행한 것이다. 반면에 국가 지진재해도 지도는 한반도에 대한 광역적인 지진재해도 분포를 산출하기 위하여 수행한 지진재해도 평가의 결과물이다. 따라서 이 지도를 작성하기 위해서는 일정하게 격자화된 지진재해도 계산 결과를 평면 지도에 투영하여 등가선과 같은 연속적인 선으로 나타내어야 한다. 이 과정에서 격자화 보간과 등가선에 대한 부드러운 곡선화 과정이 이루어질 수 있다. 이렇게 산출된 지도로부터 특정한 지점에서의 구체적인 지진재해도 수준을 추출하는 것은 자료의 보간 및 부드러운 곡선화와 같은 가공된 결과를 읽는 것과 마찬가지로이다. 따라서 특정 부지를 대상으로 평가한 1차원 지진재해도 분석 결과와 광역 분포를 파악하기 위한 2차원 지진재해도 분석 지도는 결과의 활용 목적과 산출물의 가공 정도가 서로 상이하므로, 직접적인 비교를 하는 것은 어렵다.

국가 지진재해도 지도 작성을 위한 평가가 대상 구조물을 특정하지 않는 상태에서 수행되는 일정 영역을 대표할 수 있는 지역계수로서 지진 지반운동 수준의 의미가 강한 반면, 원자력발전소를 포함한 연관 시설물 부지에 대한 지진재해도 평가는 특정한 지역에 한정되는 부지와 해당 구조물에 영향을 미치는 외력 또는 하중으로서 지진 지반운동 수준의 의미가 더 강조된다. 따라서 원자력 관련 구조물 부지에 대한 지진재해도 평가가 국가 광역 지진재해도 지도 작성을 위한 지진재해도 평가보다 더 구체적으로 평가 대상을 특정하며, 후자는 전자와 같은 개별 지점에 대한 평가 결과를 지리적으로 확장하고 그 결과를 등가선과 같은 형식으로 매끄럽게 연결되도록 하는 것이다. 따라서 지

진재해도 평가 자체에 관한 토의는 원자력발전소와 같은 특정 부지에 대하여 집중하는 것으로 충분하다.

지진재해도 평가는 수행 방법에 따라 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 구분할 수 있다. 이들 두 가지 방법은 평가 대상 지역(또는 부지)의 지진 지반운동 수준을 예측하기 위하여 지반운동을 야기하는 지진원 시나리오를 선택하는 방법의 차이에 따라 서로 다르다. 지진원 시나리오는 지진의 규모(M)와 이 지진과 부지까지의 거리(D)로 구성된다. 결정론적 방법은 가능한 시나리오를 최대한 제한하여 얻을 수 있는 최대 지진 지반운동을 선택한다. 확률론적 방법은 제한 없이 가능한 모든 시나리오의 발생률을 계산하고 일정한 수준 이상의 지반운동을 야기할 수 있는 시나리오 발생률을 결합하여 이 지반운동을 초과할 확률을 결정한다. 그러므로 확률론적 방법은 많은 수의 결정론적 시나리오를 다루는 방법이다(Abrahamson, 2006). 결정론적 방법과 확률론적 방법 모두 공학적인 의사결정 목적으로 수행되는 지진재해도 분석에서 일정한 역할을 담당한다. 일반적으로 이 두 방법이 서로 독립적인 방법으로서의 의미가 부각되지만, 실제로 이들 두 가지 방법은 지진재해도 문제에 대한 이해도를 향상시킬 수 있도록 서로 보완적인 관계에 있다(Kang, 2007). 의사결정의 정량화 정도와 지진 발생 환경 및 지진재해도 평가 대상의 범위 등에 따라서 하나의 방법이 다른 방법에 대하여 우선적으로 적용될 수 있다. 많은 경우에서 확률론적 결과가 결정론적 해석을 필요로 하거나, 그 반대의 경우가 필요한 순환적인 분석 과정을 통하여 지진재해도 평가에 대한 이해를 높일 수 있다(McGuire, 1993; 2001). 즉, 어떤 부지에 지배적인 영향을 미치는 결정적인 지진원 시나리오를 확인하기 위하여 확률론적 지진재해도 평가 결과에 대한 분해를 수행하고, 해당 부지에서의 임계 수준을 파악하기 위하여 이 결정론적 시나리오를 이용하여 평가하며, 이러한 임계 수준은 다시 확률론적 평가의 수정과 보완을 위해 다시 활용된다. 이러한 과정은, 특히 지진재해도 분석 결과의 직접적인 활용의 측면에서, 구조물 설계에 필요한 수준을 결정하거나 두 방법으로 산출되는 지진재해도 평가 결과의 신뢰도와 타당성을 상호 교차 검증하기 위하여 필요하다.

이 논문을 통하여 국내 원전부지에서 수행된 기존의 지진재해도 평가 과정에서 논의된 기술적인 제한 사항에 대하여 토의하고, 향후 보다 정량적인 평가를 위하여 필요한 방안을 제시하고자 한다. 이러한 토의의 배경에는 저자들이 원전부지 지진재해도 평가 및 국가

지진재해도 지도 작성 사업의 직접 또는 간접적인 수행을 통하여 경험한 바가 바탕을 이루고 있다. 이들 경험은 대부분 다중 지진원 시나리오를 구성하고 이들을 이용하여 해당 부지에서의 지진 지반운동 수준의 초과확률을 계산하는 절차에서 얻은 것들이다. 따라서 이 논문에서 다루는 주제를 확률론적 지진재해도 평가에 집중한다.

## 2. 확률론적 지진재해도 평가의 일반적인 특성

확률론적 지진재해도 평가를 위하여 지진원과 지진동 전달 특성을 반영하여야 한다. 이러한 두 가지 특성으로 대별되는 지진재해도 계산 입력자료의 특성은 최종적인 지진재해도 산출 결과에 영향을 미친다. 입력자료에 대한 자연적 및 지식적인 불확실성을 저감하기 위하여 다양한 노력이 진행되고 있다. 특히, 지식적인 불확실성을 정량화하기 위한 방법으로 다양한 견해와 가능한 경우에 대한 논리수목 방법이 사용되고 있다. 일반적으로 이 과정에서 전문가 집단을 구성하고, 각 전문가에게 지진원 및 지진동 전달 특성에 관한 지진재해도 계산 입력자료의 도출을 위임한다. 이들은 다양한 가능성을 감안하여, 현재의 지식으로 판단 가능한 입력자료를 제시한다. 하나의 입력변수에 대하여 다양한 견해가 제시될 수 있으며, 개별 전문가에게서도 서로 다른 값의 가능성을 허용한다. 이 모든 경우에 대하여 가중치를 부여하고, 각 변수에 할당된 값의 가중치를 감안하여 논리수목을 구성한다. 논리수목에 따라 매우 다양한 경우에 대한 지진재해도 계산이 가능하며, 모든 계산 결과를 집적함으로써 최종적인 지진재해도 산출할 수 있다. 따라서 확률론적 지진재해도는 지진이라는 임의적인 자연현상에 대하여 당대 지식 수준의 불완전성을 감안하여 평가한 지진재해의 수준을 가장 종합적인 방식으로 산출한 결과라고 말할 수 있다.

확률론적 지진재해도 평가 방법의 기본은 전적으로 불확실성을 갖는 입력자료 값들의 다양성을 종합하는 데 있다. 동일한 사건에 대하여 제시된 자료를 바탕으로 그 사건의 수준을 정량화하는데 있어서, 그 방법과 결론이 다양하게 제시될 수 있다. 우리나라 지진재해도 평가에서 이와 관련한 가장 극단적인 예는 역사시대 지진활동을 서술한 기록으로부터 지진의 크기를 평가하는 과정에서 찾아볼 수 있다. 동일한 역사지진에 대하여 전문가의 평가는 매우 다양하며, 이러한 평가는 입력자료의 다양성으로 나타난다. 확률론적 지진재

해도 평가는 어느 특정한 값으로 통일된 결과를 산출하고자 하는 것이 아니라, 이러한 다양성을 모두 고려하고자 하는데 의미가 있다. 따라서 사용한 입력자료와 가중치에 따라서 확률론적 지진재해도 평가 결과가 다양하게 나타날 수 있는 것은 너무나도 당연한 결과이고, 어느 것이 맞고 다른 것이 틀림을 판단하려는 시도는 불가능할 뿐만 아니라 무의미하다.

확률론적 지진재해도 계산 결과에 영향을 미치는 인자는 기본적으로 사용한 모든 입력자료에서 비롯된 것이며, 이를 대표하는 지진원 설정과 지진동 전달 특성, 즉 지진-지반운동 관계식의 영향은 지진재해도 평가 결과를 지배한다. 한반도와 같이 지진활동 자체의 지역적인 특성이 불분명하게 정의되는 지역에서는 특히 지진원 설정 자체가 너무나도 다양할 수 있기 때문에, 지진원의 지리적으로 설정된 기하학적인 모양과 각 지진원에 부여된 최대지진 규모와 지진활동 변수 자체에 큰 공통점을 찾아보기 어렵다. 또한 큰 규모의 지진을 계기지진 시기에 경험한 적이 없는 한반도의 경우에는 특히 지진동의 감쇄 정도에 대한 판단이 매우 어려워서, 재현주기가 긴 지진동 수준으로 갈수록 지진-지반운동 관계식에 따른 편차가 매우 큰 편이다. 이러한 편차는 확률론적 지진재해도 평가 결과의 민감도 분석에서 잘 파악할 수 있다. 과거 국내 원전부지에 대하여 평가한 확률론적 지진재해도의 민감도 분석 결과는 이러한 지진-지반운동 관계식에 따른 편차가 최종 지진재해도에 크게 영향을 미친다는 것을 잘 설명하고 있다(예, KOPEC, 2003).

확률론적 지진재해도 계산 결과의 다양성은 국내에만 국한된 양상이 아니다. 예를 들어 미국의 USGS(United States Geological Survey, 미국 지질조사소)에서는 거의 5년 주기로 국가지진재해도를 갱신하고 있으며, 매 갱신 결과에서 새로운 방식의 입력자료 평가와 적용 방법이 고려되고 있는 실정이다(<https://earthquake.usgs.gov/hazards/>). 그에 따라 매 갱신시 변화가 발생하고 있는데, 이러한 변화에 대하여 중요하게 여기는 것은 결과 자체의 변경이 아니라 최신의 자료와 방법이 어떻게 적용되었는지를 설명하는 것이다. 또한 지역에서도 평가 결과에 대한 논의가 끊임없이 이루어진다. 미국 원자력규제위원회가 평가하는 미국 내 원자력발전소 부지에 대한 지진재해도 평가에서도 비슷한 논의가 지속되고 있다. 이러한 논의에 따라서 과거 규제지침의 개정이 여러 차례 이루어져 오고 있는 실정이다(NRC, 1973; 1997; 2007). 그 결과에서 중요하게 다루는 것은 과거의 자료와 평가 방식을 현재의 최신 연구 결과

를 적용하는 방향으로 개선하고자 하는 것이지, 서로 다른 시기의 평가 결과가 다르게 나타나는 것을 지적하고자 함은 아니다.

### 3. 확률론적 지진재해도 평가 고려 사항

#### 3.1. 전문가의 역할

국내에서 가장 최근에 수행된 지진재해도 평가 관련 연구에는 NEMA (2012)과 KHNP (2015) 등이 알려져 있다. 이들 연구를 통하여 국내 지진재해도 평가의 가능성과 한계를 파악할 수 있다. 이들 연구를 통하여 전반적인 지진재해도 평가 방법과 수행 과정에 대한 국내 관련 전문가의 이해와 참여는 일정한 수준에 이른 것으로 판단할 수 있다. 다만, 지난 10여 년 동안 특정 부지 또는 광역 범위의 지진재해도 평가의 경험을 바탕으로, 국내 지진재해도 평가에 수반하는 여러 불확실성의 가장 큰 부분을 차지하는 요소 가운데 인위적인 요인에 의한 불확실성이 자리하고 있다는 것을 중요하게 고려하여야 한다. 지진재해도 분석 과정에서 동일 입력자료에 대한 여러 가지 다른 견해 또는 해석을 어떤 방식으로 적절하게 반영하여야 하는지에 대한 문제에 직면한다. 이 문제는 불확실성을 포함하는 당대의 최신 지식을 적절히 반영한 분석 결과에 전문가 판단의 다양성을 고려하는 방법에 관한 것이다 (SSHAC, 1997).

인위적인 불확실성은 입력자료 자체의 불확실성과 상관없이 입력자료를 다루는 전문가의 이해로부터 비롯된 것이기 때문에, 정량화를 통하여 개별 전문가의 지식에 대한 한계와 전문성 등에 대한 불확실성의 범위를 파악하는 것이 대단히 어렵거나 사실상 불가능하다. 즉, 전문가마다 어떤 입력자료 요소에 대한 이해의 정도가 다른 반면, 지진재해도 평가 시에는 이러한 인위적인 불확실성이 보통 고려되지 않는 것이다. 그것은 현재 확률론적 지진재해도 평가에서 일반적으로 사용하는 논리수목 방식과 전문가별 입력자료 가중치를 모두 동일하게 다루기 때문에 발생한다. 또한 최적의 입력자료를 결정하는 과정에서 특정한 과학적인 주제에 대한 전문가의 합의는 매우 어렵고, 경우에 따라서 당대의 정보만 가지고는 거의 합의가 불가능할 수 있다. 반면에 전문가 집단이 과학적으로 타당한 견해 차이를 가지고 있을 때, 주제 자체에 대한 합의를 이끌어 내기 위하여 노력하는 것이 아니라, 그러한 견해의 다양성을 어떠한 방식으로 나타낼 것인가에 대한 동의를 구하는 것이 훨씬 쉬울 것이다 (Keeney and von

Winterfeldt, 1989; 1991; Otway and von Winterfeldt, 1992). 이러한 상황에 대한 고려가 지진재해도 분석 과정에서 포함되어야 하며, 그 방식에 대한 토론 역시 일부 제안된 바가 있다 (강태섭, 박계찬, 2014). 이들은 토론에서 입력자료 도출에 참여하는 전문가에게 백지 위임이 적절하지 않으며, 가용한 입력 예시자료를 도출하고 각 예시에 어떠한 한계가 있는지를 공론화하는 것이 필요함을 강조하였다. 그래서 확률론적 지진재해도 평가는 주관식이 아닌 객관식 문제와 같이 다루어져야 한다. 또한 이 문제를 해결하는 과정은 정답을 찾는 것이 아니라 주어진 예시에서 최선의 답안이 무엇인지를 모든 전문가가 찾아가는 과정이어야 하고, 지진학 및 관련 학계가 이 예시를 개발하기 위하여 노력하여야 한다. 향후 지진재해도 평가를 수행하는 과정에서 이에 대한 더욱 활발한 토의가 이루어져야 한다.

#### 3.2. 대표지진목록 작성

국내·외에서 발표된 역사지진 및 계기지진 목록과 관련하여, 국내에서 지진재해도 평가를 수행할 때 주로 복수의 지진목록을 이용한 지진활동도 평가가 이루어졌다. 특히 국내 지진활동에 대하여 그 동안 여러 지진목록이 제시되었다. 그러나 거의 예외 없이 동일한 원전을 바탕으로 하고 있다. 지진재해도 평가가 어느 특정한 값으로 통일된 결과에 대한 산출이 아닌 다양성을 고려하는데 의미가 있기 때문에, 동일한 원전을 사용하더라도 포함된 개별 지진 사건에 대한 해석의 차이가 있는 경우에는 그 다양성이 지진재해도 평가에 반영되어야 한다. 즉, 지진목록에 따라 차이를 보이는 지진 사건에 대한 전문가들의 집중 토론 등을 통하여 다양성을 확인하고 견해를 융합하는 과정이 중요하다. 서로 다른 저자에 의하여 제시된, 또한 동일 저자에 의해서 제시된 서로 다른 지진목록은 그 근본이 같기 때문에 그 자체를 다른 지진목록으로 다루는 것은 큰 의미가 없다.

이에 대한 대안으로 연구진들과의 협의를 통한 하나의 대표지진목록을 선정한 후, 대표지진목록에 대하여 지진활동도 평가를 수행하는 방법이 있다. 이러한 방법은 최근 지진재해도 평가를 수행하는 전 세계 대부분의 나라에서 채택되고 있다 (예, 스위스 PEGASOS 프로젝트, <http://www.swissnuclear.ch/>; 미국 중동부 CEUS-SSC 프로젝트, <http://www.ceus-ssc.com/>). 이러한 방식의 의의는 지진목록 자체가 지진재해도 평가의 입력자료가 아니라, 지진원 설정 및 각 지진원의 지진활동도 평가에 지진목록이 이용되고 있기 때문이다. 향

후 국내 지진재해도 평가를 수행할 때, 두 번째 방법과 같이 표준화된 단일 지진목록 사용의 검토를 제안한다. 단일 지진목록을 작성하기 위하여, 개별 지진목록에서 차이를 보이는 특정한 지진 사건들을 도출하고, 원전에 대한 재검토와 주변 국가의 지진활동과 연계성 검토를 포함하는 재평가를 수행하는 것이 필요하다.

### 3.3. 지진원 설정

국내 확률론적 지진재해도 평가 시, 지진활동 특성과 지구물리학적 특성 및 지체구조적 특성 등으로부터 평가된 면적지진원과 이 지진원에 대하여 평가된 최대 지진이 대표적인 지표 선구조(예, 양산단층, 울산단층 등)의 지진원 특성을 반영할 수 있는지 여부는 매우 불확실하다. 더욱이 진앙이 양산단층과 인접하게 발생한 2016년 경주지진(Mw 5.5) 및 지속적인 여진활동 관측으로 지하 단층의 기하학적 양상이 비교적 상세하게 알려졌음에도 불구하고(Kim, Y. *et al.*, 2016; Kim, K.-H. *et al.*, 2016), 이 지진활동이 양산단층에 대하여 어느 정도까지를 설명할 수 있는지에 대한 논란은 아직까지도 매듭지어지지 않았다.

여전히 남겨져 있는 선형지진원에 대한 불확실성을 감안할 때, 면적지진원을 설정하고 지진활동도를 평가하는 과정에서 해당 지진원 내에서 발생 가능한 다양한 시나리오를 검토하는 것을 포함하여야 한다. 여기서 사용하는 선형지진원은 면적지진원에 대비하기 위하여 사용한 편의상의 용어로서, 공간적으로 3차원 단층면을 이루는 기하학적 특성을 나타내기 위하여 그 의미를 바로 확장할 수 있다. 이는 단층운동과 당대 지진활동의 연계성 여부를 판단하기에 아직도 불확실한 국내 대부분의 선구조 자체에 대하여 특정한 지진원 요소를 부여하기 어렵기 때문에 발생하는 문제이다. 앞에서 예로 제시한 두 개의 단층에 대한 분절이나 변위가 노두를 통하여 지질학적으로 파악된 사례를 확인하여야 하며, 이들 사례로부터 지진재해도 평가에 고려할 수 있는 지진원 시나리오를 설정할 수 있어야 한다. 이들 단층을 선형지진원으로 고려한다고 가정하였을 때, 어떤 지진원 입력자료를 부여할 수 있는지 아직까지 확인하기 어렵다. 확실하지 않고 다만 의심으로만 확신을 가지고 있을 때, 이들을 선형지진원으로 다루는 것은 오히려 불확실성만 가중하는 결과를 초래할 것이다. 굳이 이러한 의심 정도가 높은 단층들에 대한 고려가 면적지진원과 구분하여 고려되어야 한다면, 이들 단층의 선형성과 기하학적 특성을 고려한 좁은 범위의 면적지진원을 고려하는 것이 현재로서는 더

욱 타당할 것이다. 이 과정에서 주향이동단층과 경사 이동단층과 같은 전체적인 단층의 운동감각 등은 지진활동 관측과 지표 지질조사 등으로부터 거의 확실하게 확인된 정보이기 때문에, 이러한 운동감각을 구분하여 서로 다른 단층운동을 구분할 수 있도록 면적지진원을 설정할 수도 있다.

기존 국내 지진재해도 평가 연구의 대부분은 면적지진원을 설정 시, 내륙 및 한반도 근해지역을 포함하여 지진원을 설정하였다. 최근에는 인접 국가에서 발생한 지진으로 한반도 일부 지역에서 직접적인 지진 지반운동을 경험함에 따라서, 일본 및 동해 먼바다를 포함한 지진원의 설정 필요성과 일본 큐슈 지역을 포함하는 것과 같은 지리적인 범위로 확장하는 것이 고려되고 있다. 이 경우, 적절한 지진-지반운동 관계식(감쇄식 또는 감쇄공식)을 이용한 지진 지반운동 수준을 평가하여 충분히 영향을 미칠 수 있는 거리를 산출하여 지진원 설정 범위를 제한하는 방안을 고려할 수 있다. 2005년 후쿠오카 앞바다 지진 및 2016년 구마모토현 지진 등은 우리나라 남동부 지역에서 지진동이 감지된 경험이 있으므로, 한반도 남동부의 후쿠오카 해역 일대를 면적지진원에 포함하는 것은 의미있는 평가라고 사료된다.

지진재해도 평가에서 고려하는 단층활동은 직접적인 지질학적 조사를 통한 단층의 활동성 여부를 조사하는 방법과 당대의 지진활동과의 연관성을 파악하는 방법이 동시에 이루어져야 한다. 전 세계 많은 지역의 지진활동 사례를 살펴보지 않더라도, 큰 규모의 지진이 일어나는 지역은 작은 규모의 지진이 자주 발생하는 지역이 대부분이다. 유발지진 등을 포함하여, 당대의 미소지진 활동을 상세하게 파악하는 것은 단층의 활동성을 파악할 수 있는 가장 직접적이고, 가장 경제적인 방법이다. 이를 바탕으로 다음과 같은 방안을 고려할 수 있다. 첫째, 노두 또는 지형변화를 통하여 드러나지 않은 단층운동을 인지하기 위한 방안으로 지진학 및 지질학적으로 충분한 의심을 갖는 지역에 대한 고밀도 미소지진관측망을 장기간 운영한다. 이러한 방법은 이미 국내의 모두에서 효과적이고 가장 확실한 방법임이 잘 알려져 있다. 둘째, 고밀도 미소지진관측망 운영을 통하여 인지한 미소지진 활동의 범위를 파악할 수 있다면, 이 활동 범위를 시간과 공간에 대하여 적정하게 설정된 기준을 토대로 지진원 설정에 직접적으로 활용할 수 있을 것이다. 여기에 단층의 크기와 변위가 지진원 요소(규모 등)와 갖는 경험식을 토대로 최대지진 규모를 설정하고, 주변 지역 및 세계 유사 지진활동

지역과 대비를 통하여 지진활동도를 평가하는 방법을 고려할 수 있을 것이다.

### 3.4. 지진-지반운동 관계식 개발

지진-지반운동 관계식(ground-motion prediction equation, GMPE)은 우리나라에서 감쇄식(ground-motion attenuation equation) 또는 감쇄공식으로 더 자주 일컬어지지만, 비교적 최근에 개발된 관계식은 지진에너지의 전파과정에서의 감쇄효과만을 다루는 것이 아니라 진원 특성 및 부지효과도 포함하기 때문에 ‘감쇄식’ 또는 ‘감쇄공식’과 같은 용어는 이 관계식이 포함하고 있는 물리적인 의미를 지나치게 단순화한 표현이다. 국내에서 관측 경험을 통하여 지진-지반운동 관계식을 개발하고 수정하는 것에 존재하는 한계는 너무도 분명하고 제한적이다. 따라서 미소지진 합성과 강지진동 모사 방법을 근간으로 하는 것은 변하기 어려운 상형인 것으로 판단된다. 다만 2000년대 이후 지금까지 축적된 규모 5.0 내외의 지진관측 결과가 상당히 축적되었기 때문에, 기본적으로 이들 자료를 포괄하여 기존 지진-지반운동 관계식을 재평가하고 수정하기 위한 연구가 선행되어야 한다. 또한 국내 지진-지반운동 관계식 개발에서 지금까지 크게 고려되지 않았던 부분이 부지효과인데, 국내 지진관측소에 대한 부지효과를 파악하여 지진-지반운동 관계식이 암반과 자유장을 구분하여 다룰 수 있도록 하는 연구가 수행되어야 한다.

고밀도 지진관측망 운영을 통하여 확인할 수 있는 지하 잠재단층을 포함하여 노두를 통하여 확인할 수 있는 활동성단층의 기하학적 특성을 고려한 단층 지진원에 대한 지진-지반운동 관계식 연구가 필요하다. 또한 이러한 지진-지반운동 관계식은 반드시 큰 규모 범위를 무리하게 외삽함으로써 불확실성을 감소하는 포괄적인 식이 될 필요도 없다. 근거리의 소규모 지진에 의한 고주파수 지진동 효과를 예측할 수 있는 지진-지반운동 관계식 개발도 중요하게 다루어져야 하는 사항이다.

과거 더 방대한 양의 자료를 사용하거나 지진-지반운동 관계식의 함수 형태에서 부가적인 항을 고려하는 방식으로 지진동 전달 특성의 자연적(임의적)인 불확실성을 나타내는 변수( $\sigma$ )를 줄이려는 시도는 대부분 성공적이지 못하였다. 그 이유는 이 과정에서 수반된 또 다른 불확실성을 고려하지 않았기 때문이다. 우선 많은 자료의 사용이 만능이 아니며, 복잡한 함수의 사용이 더 나은 결과를 가져오지 않는다는 점을 전제로 하여야 한다. 이를 배경으로 지진동 전달 특성의 자연적

불확실성 변수( $\sigma$ ) 제시를 위해서는 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다.

첫째, 기존 자료 선별을 위한 과정이 필요하다. 이 과정은 매우 지루할 수도 있다. 하지만 자연적인 불확실성은 저감하여야 할 대상이 아니라, 올바르게 인지하여야 할 대상이기 때문에 자료에 포함되어 있을 수 있는 오류를 줄이기 위하여 기존 자료를 상세하게 검토하고 좋은 자료만을 선별하는 과정이 필요하다. 또한 보통 선형회귀방법보다는 최대우도법과 같은 방법이 다른 여러 분야에서도 더욱 나은 결과를 내는 것으로 알려져 있다. 이들 방법(또는 가능한 다른 방법을 포함)을 비교하여, 지진동 전달 특성의 자연적 불확실성 변수( $\sigma$ ) 추정에 있어서 큰 잔차값의 영향을 줄이는 방법을 찾는 과정이 필요하다.

둘째, 지진-지반운동 관계식 개발에 있어서 지진동 발생과 전파를 다루는 물리적인 과정을 더욱 정확하게 표현하기 위하여 방정식의 형태를 복잡하고 정교하게 다룰 수 있다. 이러한 방식에는 지진 지반운동의 대표값(즉, 중앙값 또는 평균값) 추정에 분명한 임점이 있다. 하지만 지진동 전달 특성의 자연적 불확실성 변수( $\sigma$ ) 추정과 감소에는 별로 도움이 되지 않는다. 앞에서 언급한 바와 같이, 식의 복잡성은 또 다른 불확실성을 야기하기 때문이다. 그래서 다음과 같이 지진-지반운동 관계식의 목적을 분명히 할 필요가 있다. 즉, 우리가 얻고자 하는 목표가 정확한 지반운동 대표값인지, 아니면 지진동 전달 특성의 자연적 불확실성 변수( $\sigma$ )를 가능한 한 줄이는 것인지를 판단하여야 한다. 이 둘 사이에는 분명한 상충관계가 있다.

대개의 지진-지반운동 관계식 개발자들이 정확한 지반운동 대표값을 얻기 위하여 노력을 치중하는 경향이 있다. 그래서 많은 수치모의와 많은 자료를 활용하고자 하는 것이다. 그러나 지진재해도 평가에는 또 다른 분명한 요소가 있다. 즉, 정확한 지진재해도 평가는 정확한 지반운동 대표값 보다는 지진동 전달 특성의 자연적 불확실성 변수( $\sigma$ )의 영향이 막대하다. 따라서 지진-지반운동 관계식을 개발하는 전문가는 해당 지진-지반운동 관계식이 지반운동 예측을 목적으로 하는지 또는 지진재해도 평가를 목적으로 하는지에 따라 개발 방향과 목표를 분명하게 설정하는 것이 필요하다.

지진-지반운동 관계식에 대한 논의의 목적을 지진재해도 평가로 제한할 경우를 더욱 상세하게 다룰 수 있다. 그렇다면 지반운동 대표값을 정확히 얻기 위하여 복잡한 지진-지반운동 관계식 함수나 더 많은 자료를

사용하는데 치중하는 것보다는, 사용할 수 있는 국내외 자료를 더 정확하게 하기 위한 선별과정에 더 큰 노력을 기울여야 한다. 이것이 지진재해도 평가 결과의 불확실성에 큰 영향을 주는 지진동 전달 특성의 자연적 불확실성 변수( $\sigma$ )의 분산도를 줄일 수 있는 방법이 될 것이다. 따라서 향후 필요한 관련 연구 항목으로 다음 두 가지를 들 수 있다. 첫째, 지진-지반운동 관계식의 개발 방향과 목적에 따른 차이를 밝히고 어떤 지진-지반운동 관계식이 지진 지반운동 예측에 더 적합한지 또는 지진재해도 평가에 더 적합한지를 판단하는 것이 있다. 둘째, 개발에 필요한 정확한 자료 선별과 포함한 자료에 따라 지진-지반운동 관계식이 어떻게 지진 지반운동 예측 또는 지진재해도 평가 결과에 영향을 미치는지 연구하여야 한다.

### 3.5. 지진재해도 평가 절차

국내 원자력발전소 부지에 대한 지진재해도 연구를 수행하는 과정에서 지진재해도 입력자료의 불확실성을 고려하기 위한 방법으로 미국원자력규제기관에서 제시한 Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC, 1997)의 절차를 도입하고 레벨(level) 2/3 (Level 2를 기본으로 두고, Level 3의 워크샵을 통한 전문가들의 다양한 견해 도출과 반영)를 수행한 바 있다(KHNP, 2015). 지진재해도 평가를 수행할 때, 입력자료의 불확실성을 줄이기 위하여 도입되는 SSHAC 절차에는 다양한 역할을 가진 전문가 집단의 의견 교류가 필수적이다. 이 과정에서 전문가 개인(또는 팀)이 제시하는 입력자료에 대하여 지진재해도 평가를 위한 최종 입력자료로 결정하기 위해서는 국내 지진학계의 구성과 활동 환경을 검토하고 이에 부합하는 합리적인 절차를 마련하여야 한다.

기본적으로 SSHAC 절차가 갖는 타당성과 합리적인 의견 개진 방식을 추구하는 것은 합리적이다. 다만, 이 절차의 모든 레벨 또는 일부라도 만족할 수 있는 여건을 세계 어떤 지역에서든 갖출 수 있는가는 별개의 문제이다. 지나치게 기계적인 적용이 이루어지는 것은 바람직하지 않다. 결국 SSHAC 절차나 세부적인 확률론적 지진재해도 평가 절차 모두 다양한 견해를 모두 수용함으로써 도출된 결과에 대하여 사회적, 적어도 전문가적인, 합의가 이루어진 것임을 강조하기 위한 적절한 방안을 제시하는 것일 뿐이며, 도출된 결과가 옳음을 뒷받침하기 위한 방안을 목적으로 하지는 않는다. 즉, 이렇게 다양한, 심지어 반대의견까지도 수용하여 도출된 것이므로 우리가 할 수 있는 최선의 것임을 가

능한 한 객관적으로 보여줌으로써 이차적인 논란 확대를 종식하고자 하는 것이다. 이 절차를 고안한 북미 지역 역시 상황이 크게 다르지 않으며, 북미 지역의 상황이 그 정도라면 세계 그 이외의 지역에서 이 절차에 따라 높은 레벨을 만족하기는 더욱 어렵다. 우리나라에서 그러한 절차에 따른 레벨을 상향하기 위한 형식에 지나치게 엄매일 경우, 그 형식으로 인한 인위적인 불확실성이 결과의 신뢰도를 저하시킬 가능성도 배제할 수 없다는 것이 중요한 쟁점이다.

적어도 우리나라와 유사한 전문가 집단 환경에서 전문가들이 할 일은 가능한 모범답안을 구축하고, 보다 덜 전문적이지만 제시된 자료를 검토하고 판단할 수 있는 학자들의 집단에서 토론하고 이해를 높일 수 있는 여건을 만드는 것이 중요하다. 우리나라의 현실은 자신의 견해에 대한 주장이 강하게 작용하고, 특수한 한국인의 예의와 관습이 자연현상에 대한 사실 인식보다 우위에 있어서, 전문가가 논의 자체를 회피하는 역설적인 상황마저 발생하기도 한다. 이 모두가 주장의 과잉과 설득의 결여에서 비롯된 현상임을 간과하지 말아야 한다.

입력자료 준비에 참여하는 전문가들이 모든 입력변수에 대하여 모두 다 잘 이해하고 판단할 수 있을 것으로 기대하기는 어렵다. 따라서 지진재해도 평가를 위한 다양한 입력자료에 대하여 이를 가장 잘 평가하고 분석할 수 있는 전문가 또는 전문가 집단이 모범자료를 만들고, 이에 대한 설명의 기회를 가지며, 이외의 전문가 집단이 토의함으로써 입력자료에 대한 이해를 높여서 제시된 자료를 판단하는 일련의 과정이 필요하다. 이 방안은 국내 원전과 관련하여 준용하고자 하는 SSHAC 절차의 변형된 형태로 운영될 수도 있을 것이다.

원자력발전소의 객관적인 안전성을 확보하기 위해서 제3자의 검증이 요구되고 있다. 그러나 국내 전문가들의 경우 상대적으로 SSHAC 절차가 익숙하지 않은 반면, 국외 전문가들의 경우 국내의 지질 및 지진 연구 현황에 대한 이해가 부족하다. 이러한 상황을 고려하였을 경우, 국내의 검증에 대한 검증자의 역할 또는 검증 방안에 대한 검토가 필요하다. 과거 SSHAC 절차 이행 과정을 통하여 이에 대한 몇 가지 교훈을 얻을 수 있다. 당시 과제 기술융합 전문가(Project Technical Integrator, PTI) 역할을 하는 국외 전문가는 양산단층 등에 대한 선형지진원 설정이 필요함을 설득하고자 하였다. 지질학자로서의 전문적인 관심사를 대입하고자 한 것으로 판단할 수 있다. 결과적으로 국내 전문가 집단으로부터 가능한 정보의 부족으로 지진원 설정에

필요한 정량화된 값을 현재로서는 얻기 어렵기 때문에 선형지진원은 보다 정량적인 단층조사 및 활동특성 분석 과정을 수행하여 향후에 고려할 수 있는 것으로 토의되었다.

어느 지역이든 가능한 지식과 정보를 이용하여 최선의 확률론적 지진재해도 평가 결과를 얻어야 하는 것은 기본이다. 절차와 의심만으로 당시에 확인하기 어려운 항목을 무리하게 대입하고자 하는 시도는 불확실성을 높이는 입력자료의 생성이며, 이는 확률론적 지진재해도 평가 절차에서 하지 말아야 할 또 다른 인위적인 요소의 개입이라고 할 수 있다. 앞에서 지진-지반운동 관계식과 관련된 토의와 마찬가지로, 대표값을 얻는 것이 목적이라면 사건이 가장 안 일어날 경우로부터 극한의 사건이 일어날 경우를 모두 다룰 수 있다. 하지만 확률론적 지진재해도 평가는 불확실성의 범위를 낮추는 것이 더 큰 목표이기 때문에, 개별 요소에 대한 불확실성이 파악된 상태에서만 고려하는 것이 타당하다. 양산단층을 예로 들면, 최소한 분절이 몇 가지 경우로 가능하며, 재현주기에 대한 최소한의 정보 제공 여부, 과거에 발생한 것으로 확인할 수 있는 운동이 있는지 여부, 가능할 수 있는 규모 등에 대한 정보 제공이 가능한지 여부 등에 대하여, 이전에 조사한 결과를 토대로 크든 작든 어떤 범위가 제시될 수 있는가가 선형지진원 고려 여부의 핵심이다. 그렇지 않을 경우, 이 단층을 포괄할 수 있는 범위의 면적지진원 설정이 더욱 타당하며, 이 설정이 적어도 가짓수로는 확률론적 지진재해도 평가의 불확실성을 확대시키지 않는 방안이다.

일련의 과정을 거쳐 도출한 확률론적 지진재해도 평가 결과 역시 하나의 연구 결과물이다. 연구 결과에 대한 제 3자의 검토가 수반될 수 있다. 그러나 현실적으로 이 결과를 도출하는데 참여하지 않은 제 3자가 이 결과를 검증하는 것은 거의 불가능하다. 검증이란 자료와 사건 및 대상에 대하여 동등하거나 그 이상의 이해 수준과 능력을 가진 사람이 동등하거나 또는 대체할 수 있는 방법으로 주어진 결과에 대한 과학적인 재현 가능성을 확인하는 절차를 말한다. 이러한 측면에서 제시된 결과에 대하여, 원 저자가 사용한 자료에 문제가 있는지 검토하고 수행한 절차와 방법이 타당한 것인지, 제 3자가 검토하는 것은 당연히 필요하다. 하지만 그 이상의 역할 수행을 하는 것은 근본적으로 불가능한 것이며, 이를 목적으로 소요되는 경제적 비용을 오히려 불확실성을 낮추기 위한 입력자료 확보 등의 조사에 투입하는 것이 보다 효과적일 수 있다.

#### 4. 결 론

확률론적 지진재해도 평가 결과에 영향을 미치는 인자는 기본적으로 사용한 모든 입력자료에서 비롯된 것으로, 입력자료는 지진원 설정 및 지진원이 수반하고 있는 지진활동도 평가와 지진동 전달 특성으로 구분할 수 있다. 이러한 입력자료의 제공과 평가 절차를 국내 원전 부지에 적용할 경우, 현재 시점에서의 제한점과 향후 고려하여야 할 사항에 대하여 토의하였다. 지진재해도 평가에서 전문가의 역할은 평가에 참여하는 모든 전문가가 개별적으로 입력자료를 제공하는 것 보다 는 입력자료 모델 개발자와 가능한 모델에 대한 선별자의 역할로 구분되어야 한다. 지진재해도 평가를 위한 지진목록 자체는 지진재해도 평가의 입력자료가 아니라, 지진원 설정 및 각 지진원의 지진활동도 평가를 위한 하위 단계의 정보이므로 개별 지진목록이 갖는 의미는 제한적이다. 따라서 대표지진목록 작성을 통하여 지진재해도 평가의 불확실성 요소를 줄일 수 있다. 부정확하거나 부족한 정보로 인하여 선형지진원을 설정하기 어려운 경우에 좁은 구역의 면적지진원으로 대체하는 것을 추천하며, 인접 국가에서 발생하는 지진-지반운동의 영향을 고려할 수 있도록 지진원 설정 영역을 확장하여야 한다. 지진재해도 평가를 위한 지진-지반운동 관계식을 개발하기 위해서는 지반운동 대표값을 정확히 얻기 위하여 복잡한 지진-지반운동 관계식 함수나 더 많은 자료를 사용하는데 치중하는 것보다 사용할 수 있는 국내외 자료를 더 정확하게 하기 위한 선별과정에 더 큰 노력을 기울여서 지진동 전달 특성의 자연적 불확실성 변수( $\sigma$ )를 감소시킬 수 있도록 해야 한다. 지진재해도 평가를 위한 다양한 입력자료에 대하여 이를 가장 잘 다룰 수 있는 전문가 또는 전문가 집단이 모범자료를 만들고, 이에 대한 설명의 기회를 가지며, 이외의 전문가(다소 비전문가일지라도) 집단이 토의함으로써 입력자료에 대한 이해를 높여서 제시된 자료를 판단하는 일련의 과정이 필요하다. 이 방안은 국내 원전과 관련하여 준용하고자 하는 SSHAC 절차의 변형된 형태로 운영될 수 있다.

이 토의를 통하여 다루지 못한 중요한 주제들, 예를 들어 지진목록의 완전성 향상, 최대지진 규모의 평가, 지진활동도 평가 등과 같이 입력자료 결정을 위한 보다 세부적인 사항들 역시 동등한 중요성을 가지지만, 이 논문에서 다른 주제들에 비하여 보다 구체적이고 기술적인 사항들로 판단하여 배제하였다. 이 주제들에 대해서는 후속 연구를 통하여 다룰 것이다. 또한 제한



된 시나리오를 다루는 결정론적 방법에 대한 토의 역시 2016년 경주지진 이후 다양한 기관이 거의 동시다발적으로 광범위하게 진행하고 있는 활성단층조사 사업의 결과가 어느 정도 윤곽이 드러나는 시점에서 지진재해도 평가를 위하여 그 결과들을 실제 적용하는 것을 고려하면서 본격적으로 가능할 것으로 기대한다.

## 사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었습니다. 이 논문에서 토의의 주제로 다룬 여러 문제 제기과 해결 방안들은 저자들만의 고유한 것이 아니며, 이전에 공식 또는 비공식적인 관련 토의에 직접 및 간접적으로 참여하였던 많은 전문가들의 기여가 있었기에 가능한 것입니다. 따라서 모든 사항들이 올바르게 기술되지 않았을 가능성을 내포하고 있는데, 이는 전적으로 저자들의 지식 부족과 오해로 인한 것입니다. 국내 지진재해도 평가의 수준 향상을 위하여, 관련 전문가들의 활발한 토의와 함께 보완과 오류 수정을 위한 문제제기를 부탁드립니다. 아울러 이 논문의 초고에서 부족한 설명과 오류에 대한 상세한 지적과 수정 방향을 조언해주신 익명의 심사위원들께 깊은 감사를 드립니다.

## References

- Abrahamson, N. (2006) Seismic hazard assessment: problems with current practice and future developments. Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Keynote Lecture.
- Cao, T., Petersen, M.D. and Reichle, M.S. (1996) Seismic hazard estimation from background seismicity in southern California. Bulletin of the Seismological Society of America, v.86, p.1372-1381.
- Kafka, A.L. and Levin, S.Z. (2000) Does the spatial distribution of smaller earthquakes delineate areas where larger earthquakes are likely to occur? Bulletin of the Seismological Society of America, v.90, p.724-738.
- Kang, T.-S. (2007) Prediction of strong ground motion in moderate-seismicity regions using deterministic earthquake scenarios. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, v.11(4), p.25-31.
- Kang, T.-S. and Park, J. (2014) Role of expert panel in probabilistic seismic hazard analysis. Proceedings of EESK Conference 2014, Earthquake Engineering Society of Korea, p.21-22
- Keeney, R.L. and von Winterfeldt, D. (1989) On the use of expert judgement on complex technical problems. IEEE Transactions on Engineering Management, v.36, p.83-86.
- Keeney, R.L. and von Winterfeldt, D. (1991) Eliciting probabilities from experts in complex technical problems. IEEE Transactions on Engineering Management, v.38, p.191-201.
- KHNP (2015) An Investigative Study on the Maximum Earthquake of Nuclear Power Plant Sites, Korea Hydro and Nuclear Power Company, 402p.
- Kim, K.-H., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kang, S.-Y., Han, M., Kim, J., Park, J., Kim, M., Kong, C., Heo, D., Lee, H., Park, E., Park, H., Lee, S.-J., Cho, S., Woo, J.-U., Lee, S.-H. and Kim, J. (2016) The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 2. Temporary seismic network for monitoring aftershocks. Geosciences Journal, v.20, p.753-757.
- Kim, Y., Rhie, J., Kang, T.-S., Kim, K.-H., Kim, M. and Lee, S.-J. (2016) The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 1. Observation and remaining questions. Geosciences Journal, v.20, p.747-752.
- KOPEC (2003) Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Sinwolsong 1 & 2 Nuclear Power Plant Site, Korea Power Electric Company, 147p.
- McGuire, R.K. (1993) Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. Bulletin of the Seismological Society of America, v.85(5), p.1275-1284.
- McGuire, R.K. (2001) Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v.21(5), p.377-384.
- NEMA (2012) Construction of Active Fault Map and Seismic Risk Map, National Emergency Management Agency, Korea, 899p.
- NRC (1973) Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.60, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 6p.
- NRC (1997) Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide 1.165, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 45p.
- NRC (2007) A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide 1.208, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 24p.
- Otway, H. and von Winterfeldt, D. (1992) Expert judgement in risk analysis and management: process, context, and pitfalls. Risk Analysis, v.12, p.83-93.
- SSHAC (1997) Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts. NUREG/CR-6372. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 256p.