

원자력 발전소 부지에 대한 확률론적 지진해일 재해도 분석의 적용

Application of Probabilistic Tsunami Hazard Analysis for the Nuclear Power Plant Site

이현미^{1)*} · 김민규²⁾ · 신동훈¹⁾ · 최인길²⁾

Rhee, Hyun-Me^{1)*} · Kim, Min Kyu²⁾ · Sheen, Dong-Hoon¹⁾ · Choi, In-Kil²⁾

¹⁾전남대학교 지구환경과학과, ²⁾한국원자력연구원 종합안전평가부

¹⁾Department of Earth Systems and Environmental Science, Chonnam National University, ²⁾Integrated Safety Assessment Division, Kora Atomic Energy Research Institute (KAERI)

/ A B S T R A C T /

The tsunami hazard analysis is performed for testing the application of probabilistic tsunami hazard analysis to nuclear power plant sites in the Korean Peninsula. Tsunami hazard analysis is based on the seismic hazard analysis. Probabilistic method is adopted for considering the uncertainties caused by insufficient information of tsunamigenic fault sources. Logic tree approach is used. Uljin nuclear power plant (NPP) site is selected for this study. The tsunamigenic fault sources in the western part of Japan (East Sea) are used for this study because those are well known fault sources in the East Sea and had several records of tsunami hazards. We have performed numerical simulations of tsunami propagation for those fault sources in the previous study. Therefore we use the wave parameters obtained from the previous study. We follow the method of probabilistic tsunami hazard analysis (PTHA) suggested by the atomic energy society of Japan (AESJ). Annual exceedance probabilities for wave height level are calculated for the site by using the information about the recurrence interval, the magnitude range, the wave parameters, the truncation of lognormal distribution of wave height, and the deviation based on the difference between simulation and record. Effects of each parameters on tsunami hazard are tested by the sensitivity analysis, which shows that the recurrence interval and the deviation dominantly affects the annual exceedance probability and the wave height level, respectively.

Key words: Tsunami, Nuclear power plant (NPP), Logic tree, Probabilistic tsunami hazard analysis (PTHA)

1. 서론

지난 2011년 동일본 대지진과 그로 인한 지진해일로 인하여 후쿠시마 원자력 발전소에서 사고가 발생하였다. 이 사고를 통하여 지진뿐만 아니라 지진해일이 원자력발전소에 미치는 영향과 재해에 대한 관심이 높아졌다. 특히 현재 우리나라에서 운영 중인 모든 원자력 발전소들은 원자로의 냉각을 위하여 해수를 사용하고 있다. 이 때문에 모든 발전소가 해안에 건설되었으며 지진해일 재해도 분석에 대한 필요성이 강력히 제기되고 있다. 원자력 발전소에 대한 지진해일 재해도 분석은 부지에 대한 안전성 평가에 필요한 요건이다. 지진재해도의 경우에는 결정론적인 방법과 확률론적인 방법을

이용하여 최대지반가속도나 스펙트럴 가속도 준위에 따른 연초과확률로 산출하여 부지에 대한 리스크 평가에 고려되었던 반면 지진해일 재해도의 경우에는 홍수나 태풍과 같은 기타 자연재해로 간주되어 간략한 평가만을 수행해왔다. 따라서 국내 원자력 발전소에 대한 지진해일 재해도 분석을 위한 기본적인 방법 정립 및 그 적용에 대한 연구가 시급하다.

지진해일 재해도 분석은 기본적으로 지진재해도 분석 방법에 그 기반을 두고 있다[1]. 지진재해도 분석은 앞서 언급한 바와 같이 결정론적인 방법과 확률론적인 방법에 의해 수행되고 있다. 결정론적인 방법은 최적의 지진 지체모델과 지진동 예측식을 고려하여 부지에 대한 지진재해도를 산출하는 것으로, 간단하고 직관적이라는 장점을 가지고 있지만 모델에 대한 민감도가 크다는 단점을 가지고 있다. 지진재해도 분석에 사용되는 지진지체모델이나 지진동 예측식을 결정하는 과정에는 많은 지진학적 및 구조지질학적인 자료가 사용되는데 이러한 자료에는 많은 불확실성이 포함되어 있다.

*Corresponding author: Rhee, Hyun-Me

E-mail: rhee_hm@naver.com

(Received June 19, 2015; Revised August 20, 2015; Accepted August 25, 2015)

불확실성이 포함된 자료를 바탕으로 결정된 지진지체모델과 지진동 예측 식에도 필연적으로 불확실성이 내재하게 된다. 이러한 불확실성을 재해도 분석에 효과적으로 반영하기 위하여 고안된 방법이 확률론적 방법이다. 확률론적인 방법은 다수의 지진지체모델과 지진동 예측식을 가중치와 함께 고려하는 방법으로, 복잡하다는 단점을 가지고 있지만 모델에 대한 민감도가 작고 다양한 의견을 수렴할 수 있다는 장점을 가지고 있다[2,3,4]. 또한 발생 가능한 최대 잠재지진이 지진원 내에서 부지와 가장 가까운 곳에서 발생한다는 가정을 포함하고 있는 결정론적인 방법과 달리 확률분포를 따르는 것으로 가정되는 확률론적인 방법이 보다 현실적이라는 평가를 받고 있다. 따라서 최근에서는 확률론적인 방법에 의한 재해도 분석이 결정론적인 방법에 의한 재해도 분석보다 더 주목받고 있으며, 불확실성 저감과 관련된 연구가 다수 수행되고 있다[5-8].

국내에서 수행된 지진해일과 관련된 연구들은 대부분 수치모의 방법에 대한 타당성과 사용된 수치모의 프로그램을 검증하는 연구들로서, 지진해일에 의한 재해도 대해서도 발생 가능한 파고의 높이에 초점을 맞추어 연구가 수행되었다[9-12]. 본 연구는 원자력 발전소 부지를 대상으로 하는 연구로서, 지진해일에 의해 발생 가능한 파고뿐만 아니라 그 재현주기가 중요하게 고려되어야 한다. 하지만 그에 대한 정보가 부족하여 지진해일 재해도 분석에 대한 연구가 충분한 자료에 기초할 수 없으므로, 입력 자료와 관련된 불확실성을 고려할 수 있는 확률론적인 방법에 기반을 두고 수행하고자 한다. 기존 우리나라에서 수행되었던 지진해일 재해도 분석은 원자력 발전소의 부지를 결정하기 위하여 수행된 단순한 분석이었으므로, 본 연구에서는 일본에서 수행되었던 확률론적 지진해일 재해도 분석 방법[13-16]을 적용하였다. 지진해일 수치모의 프로그램을 이용한 선행연구[17]를 통하여 지진해일 재해도 분석에 필요한 파고 변수를 도출하였다. 본 연구에서는 도출된 파고 변수를 바탕으로 작성된 논리수목을 이용하여 울진 원자력 발전소 부지에 대한 확률론적 지진해일 재해도 분석과 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 또한 이를 통하여 확률론적 지진해일 재해도 분석 방법의 국내 적용 타당성을 보였다.

2. 지진해일 유발 단층 지진원과 입력 변수

본 연구에서는 울진 원자력 발전소 부지를 연구 대상 부지로 선정하여 확률론적 지진해일 재해도 분석을 수행하고자 한다. 울진 원자력 발전소는 동해안에 위치한 발전소로, 발전소 부지에 영향을 미칠 수 있는 지진해일 진원역에는 일본 홋카이도 서부의 동해 먼 바다, 일본 중북부의 동해 먼 바다, 우리나라 강원도 및 경상도의 동해 근해 지역 등이 있다. 울진 원자력 발전소에 영향을 미칠 수 있는 지진해일 진원역 중에서 지진원 정보에 대한 신뢰성과 자료 취득의 용이성을 바탕으로 일본 원자력학회[16]가 제시한 일본 서부의 동해 먼 바다에 위치한 지진해일 유발 단층 지진원에 대한 정보를 사용하였다. 선행연구[17]에서도 일본 원자력학회가 제시한 지진해일 유발 단층 지진원에 대한 정보가 사용되었으며, 지진원에 대하여 추정된 최대잠재지진의 규모를 바탕으로 스텝링 법칙을 적용하여 단층에 대한 변수를 결정하고, 이를 이용하여 지진해일 수치모의를 수행하였다. 분석을 통하여 도출된 파고변수는 발생 가능한 최대 잠재지진의 규모와 지진원의 위치 및 단층의 주향에 의한 영향이 큰 것으로 판단되었다. 이를 통하여 본 연구의 연구대상 부지인 울진 원자력 발전소에 대하여 가장 영향력이 크다고 판단되

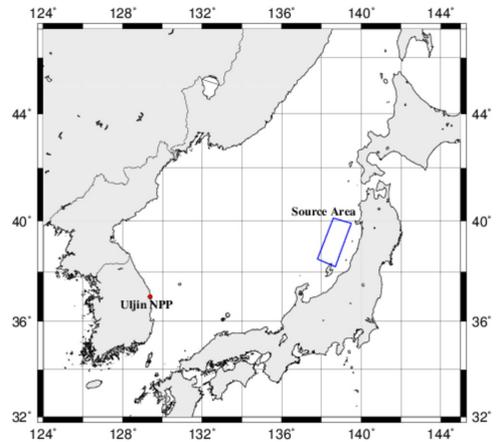


Fig. 1. Map showing locations of the tsunami generation area and the Uljin NPP

는 일본 사도섬 북쪽 바다에 위치한 지진해일 유발 단층 지진원에 대한 정보를 바탕으로 지진해일 재해도 분석을 수행하고자 한다. 이는 본 연구가 국내 원자력 발전소에 대한 확률론적 지진해일 재해도 분석 방법의 적용 타당성을 검토하기 위한 것으로, 다수의 지진원을 고려하는 것보다는 단일 지진원을 바탕으로 민감도 분석을 비롯한 지진해일 재해도 분석과 관련된 일련의 연구에 대하여 종합적으로 기술하기 위한 것이다.

일본 사도섬 북쪽 바다의 지진해일 유발 단층 해역과 발전소의 위치는 Fig. 1에 나타나 있다. 해당 지진해일 유발 단층 지진원은 최대잠재지진의 규모가 M_w 7.8이며, 그 재현주기는 약 500-1000년 정도인 것으로 추정되었다[16].

지진해일 재해도 분석을 수행하기 위해서는 다수의 변수가 요구되며, 이들 변수가 가지는 불확실성을 재해도에 효과적으로 반영하기 위하여 고안된 방법이 확률론적인 방법임을 기 설명한 바 있다. 본 연구에서는 확률론적 지진해일 재해도 분석을 수행하기 위하여 논리수목을 이용하였다. 논리수목은 다수의 항목에 대하여 여러 개의 변수들을 동시에 고려하기에 용이한 방법으로, 각각의 사건에 대하여 나무가 가지를 치는 것과 같이 퍼져나가는 형태를 취한다. 지진해일 재해도 분석에서는 지진해일 유발 단층 지진원에 대한 최대잠재지진과 규모분포, 재현주기, 경사각, 수치모의 프로그램 및 수치모의를 통하여 계산된 파고변수가 고려해야 할 항목이 되며, 각각의 항목에 대하여 가중치를 가지는 여러 개의 변수들이 고려된다. 재해도 계산에 고려되는 항목 중에서 단층의 주향이 아닌 경사각이 고려되는 이유는 단층의 주향에 대한 불확실성보다 경사각에 대한 불확실성이 더 크기 때문이다. Fig. 2가 확률론적 지진해일 재해도 분석을 위하여 고려되어야 하는 변수들에 대한 논리수목의 간단한 예이다.

일반적으로 지진의 발생 빈도와 최대 지진규모는 Gutenberg-Richter 관계식으로 대표되는 지수모델로 평가되며, 지진해일은 거의 동일한 지역 내에서 유사한 규모의 지진에 의해 발생하는 것으로 평가되고 있다. 따라서 본 연구에서 고려하고 있는 지진해일에 대한 모델은 지수모델과 특성지진모델이 결합된 형태로서, 특성지진의 성격을 고려하여 범위를 가지는 지진 규모 분포가 고려된다. 본 연구에서는 최대 잠재지진의 규모로 추정된 M_w 7.8를 기준으로 ± 0.2 규모 분포와 ± 0.1 규모 분포 및 최대 잠재지진의 규모를 중심으로 ± 0.1 의 규모인 M_w 7.7와 M_w 7.9를 기준으로 ± 0.1 규모 분

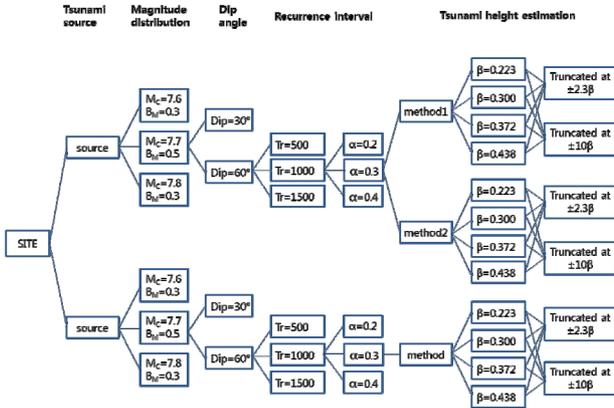


Fig. 2. Concept of logic tree for probabilistic tsunami hazard analysis

포를 고려하였다. 즉 하나의 지진원을 대상으로 최대잠재지진의 규모와 규모 분포를 달리하는 4개의 규모 분포 ($M_W 7.8 \pm 0.2$, $M_W 7.8 \pm 0.1$, $M_W 7.7 \pm 0.1$, $M_W 7.9 \pm 0.1$)를 입력변수로 사용하였다. 지진해일 재해도 분석을 수행하기 위해서는 발생 가능한 파고에 대한 확률분포를 도출하여야 하며 이를 위하여 지진해일 수치모의를 수행한다. 발생 가능한 최대잠재지진의 규모를 바탕으로 스케일링 법칙[16]을 적용하여 단층에 길이와 폭, 변위와 같은 변수를 도출하였으며, 이를 이용하여 선행연구에서 울진 원자력발전소 부지를 대상으로 지진해일 수치모의를 수행하였다. 적용된 스케일링 법칙은 단층의 경사각에 따라 상수의 단층 파열 폭을 계산할 수 있는 식으로서, 본 연구에서는 30°와 60°의 경사각을 고려하였다. 이는 지진이 주로 발생하는 깊이가 약 15 km 이내라는 점을 감안하여 일본원자력학회[16]에서 제시하고 있는 값을 그대로 사용한 것이다. 또한 지진해일 재해도 분석을 위하여 지진해일 수치모의에 대한 편차 ($\beta = \ln(\kappa)$)와 파고 분포의 절단 값에 대한 변수가 필요하다. 지진해일 수치모의에 대한 편차는 지진해일 수치모의를 통하여 추정된 파고와 실제 지진해일이 발생했을 때 기록된 파고와의 차이로, 선행 연구에서 수행된 지진해일 수치모의에 사용된 프로그램이 일본 원자력안전기구 (JNES, Japan Nuclear Energy Safety organization)에 의해 개발된 TSUNAMI_ver1.0인 점을 감안하여 일본 원자력학회가 지진해일 재해도 분석에 사용한 1.25, 1.35, 1.45, 1.55의 κ 값을 사용하였다. 또한 파고분포의 절단 값은 파고의 분포가 대수정규분포를 따른다는 가정 하에 파고에 대한 확률밀도함수를 계산하기 위하여 필요한 값으로, 본 연구에서는 대수정규분포의 표준편차에 해당하는 β 값을 기준으로 하여 2.3β 와 10.0β 의 두 값을 사용하였다. 10.0β 는 대수정규분포의 절단을 고려하지 않는 값이며 2.3β 는 대수정규분포의 절단이 대수정규분포 양 끝단의 약 1% 이내에 존재하게 하는 값이다. 1%가 특별한 의미를 가지는 것은 아니지만 계산된 재해도 결과에 대한 신뢰도를 판단할 수 있다. 즉, β 값에 의한 차이가 크다는 것은 그만큼 계산된 재해도에 대한 신뢰도가 낮을 수 있음을 의미하며, 이는 확률분포의 절단 값에 대한 민감도 분석 결과를 통하여 확인할 수 있다.

본 연구를 수행하기 위하여 고려된 입력변수는 발생 가능한 잠재지진의 규모 분포 ($M_W 7.8 \pm 0.2$, $M_W 7.8 \pm 0.1$, $M_W 7.7 \pm 0.1$, $M_W 7.9 \pm 0.1$), 재현 주기 (500 yr, 1000 yr), 단층의 경사각 (30°, 60°), 수치모의에 의한 편차

(1.25, 1.35, 1.45, 1.55), 확률분포의 절단 값 (2.3β , 10.0β)으로서, 총 128 개의 가치를 가진 논리수목이 작성된다.

3. 계산방법

일반적으로 지진은 포아송 과정 (Poisson process)을 고려하여 모델화 하지만 특성 지진에서는 BPT 분포 (Brownian Passage Time)나 대수정규 분포를 가진 모델을 고려한다[16]. 지진해일의 경우에는 앞서 기술한 바와 같이 특성 지진의 성격을 가지고 있기 때문에 후자의 모델이 사용되고 있다. 지진해일 재해도는 장기간의 평균 지진해일 재해도 (long-term stationary tsunami hazard)와 현시점에서의 지진해일 재해도 (instantaneous tsunami hazard)로 평가된다. 본 연구는 원자력발전소 부지를 대상으로 수행되었기 때문에 장기간의 평균 지진해일 재해도에 주목하여 연구를 수행 하였다. 장기간의 평균 지진해일 재해도는 파고 h 을 초과하는 연평균 확률 λ 로서 나타낼 수 있으며 식 (1)로 계산된다.

$$\lambda = \sum_{k=1}^n \nu_k p_k [H \geq h | one\ tsunami] \quad (1)$$

여기서, ν_k 는 k 지역에서의 평균 발생주기로부터 결정된 지진해일의 연평균 확률이고, $p_k [H \geq h | one\ tsunami]$ 는 k 지역에서 지진해일의 초과 확률이다. 지진해일의 파고에 대한 초과확률은 지진해일에 대한 확률밀도 함수에 대한 적분을 통하여 계산되며, 이를 위하여 지진해일의 파고에 대한 확률밀도 함수가 필요하다. 지진해일의 파고에 대한 확률분포는 대수정규 분포를 따르는 것으로 가정하며 지진해일 수치모의를 통하여 산정된 파고 변수와 수치모의에 의한 편차가 대수정규분포의 중앙값과 표준편차가 된다. Fig. 3을 통하여 최대나 최저 파고와 수치모의에 의한 편차를 이용하여

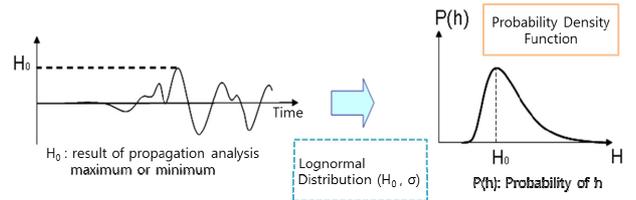


Fig. 3. Probabilistic density function for wave height [8]

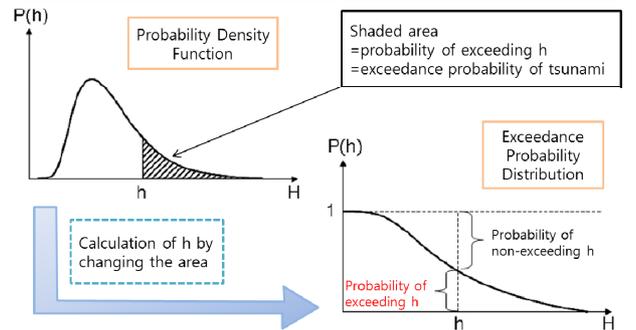


Fig. 4. Concept of exceedance probability distribution [8]

파고에 대한 확률밀도함수가 산정되는 것을 확인 할 수 있으며, 산정된 확률 밀도함수로부터 파고에 대한 초과확률을 산출하는 과정이 Fig. 4로 제시되었다.

4. 지진해일 재해도

일반적으로 지진해일에 대한 재해도를 평가할 때는 최대 파고만을 고려하여도 충분하다고 판단될 수 있지만 본 연구는 원자력 발전소 부지를 대상으로 수행된 연구이므로 최저 파고도 함께 고려하였다. 이는 원자력발전소 냉각시스템의 특징에 의한 것이다. 원자력발전은 핵분열에 의해 발생한 열로 만들어진 수증기가 터빈을 돌려 전기를 생산하는 것으로, 이 핵분열에 의한 열을 조절하기 위하여 냉각 시스템이 운영된다. 여러 가지 방법들이 원자력발전소의 냉각을 위하여 사용되고 있지만 우리나라 원자력발전소에서는 해수를 이용하는 방법을 사용하고 있다. 이 같은 이유로 현재 건설 및 운영 중인 국내 원자력발전소가 모두 해안가에 위치해 있다. 따라서 국내 원자력 발전소에 대한 지진해일 재해도 분석에는 최대파고뿐만 아니라 최저파고도 함께 고려되어야 한다.

선행연구 [17]에서도 언급한 바와 같이 파고변수를 도출하기 위한 데이터 수집 지점에 따른 불확실성을 저감하고자 Fig. 5와 같이 취수구 앞(G1), 방파제 앞(G2), 방파제 왼편(G3), 방파제 오른편(G4)의 여러 지점에서 데이터를 수집하여 그 평균값을 파고변수로 사용하였으므로, 산출된 지진해일 재해도는 파고변수를 도출하기 위하여 선정된 4개의 그룹별로 계산되었다. 파고변수 추출 그룹에 대한 평균 재해도가 Fig. 6으로 제시되었다. 파고변수 추출 그룹별 재해도를 통하여 파고변수를 추출하는 지점에 따라 부지에 대한 지진해일 재해도가 현저히 달라질 수 있음을 알 수 있다. 또한 최대 파고에 대한 각 파고변수 추출 그룹에 대한 재해도와 최저파고에 대한 각 파고변수 추출 그룹에 대한 재해도의 경향이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 부지 내에서의 구조적인 특징에 의한 것으로, 지진해일이 부지에 도달했을 때 구조물의 위치 및 형태에 따라 발생하는 해수 유출의 방해나 반사파의 증폭에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 지진해일 재해도를 산출할 때에는 부지 내의 특정 구조물의 위치나 형태에 따라 결과가 달라질 수 있으며

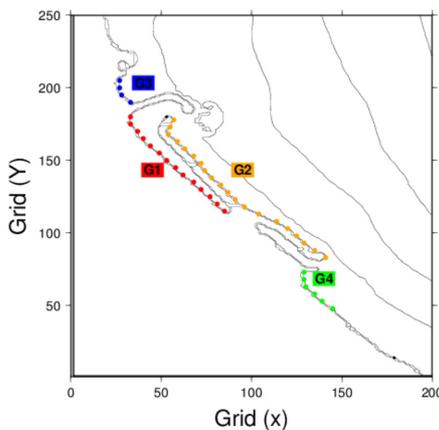


Fig. 5. The groups of the data sampling points (G1: front of intake, G2: front of breakwater, G3: left side of breakwater, G4: right side of breakwater)[17]

특정 지점에서의 재해도가 부지 내의 전체 지역에 대한 재해도를 대표할 수 없음을 인지해야 한다. 확률론적 지진해일 재해도분석은 분석에 사용된 논리수목의 분기에 따라 다수의 재해도를 얻을 수 있으며, 도출된 재해도로부터 산출평균을 취하여 최종 재해도로 산출하게 된다. 또한 평균 재해도와 더불어 백분위수를 함께 제시하여 전체 재해도가 나타내는 범위를 제시한다. Fig. 7은 앞서 연구 대상의 특성상 최저 파고가 고려되어야함을 언급했던 가장 큰 원인이 되는 취수구 앞(G1)에서의 평균 재해도와 백분위수를 나타낸 그림이다. 본 연구에서 제시하고 있는 백분위수는 전체 재해도에서의 15%, 50%, 85%에 해당하는 값을 나타낸 곡선으로, 크기순으로 정렬된 재해도의 가중치를 누적하여 그 가중치가 전체의 15%, 50%, 85%에 해당하는 재해도를 해당 백분위수의 값으로 산출하는 방법을 적용하였다. 본 연구를 통하여 계산된 울진 부지에 대한 평균 지진해일 재해도는 약 6m의 파고에 대하여 연초과확률 약 1.0E-5의 확률로 약 100,000년의 재현주기를 나타냈다.

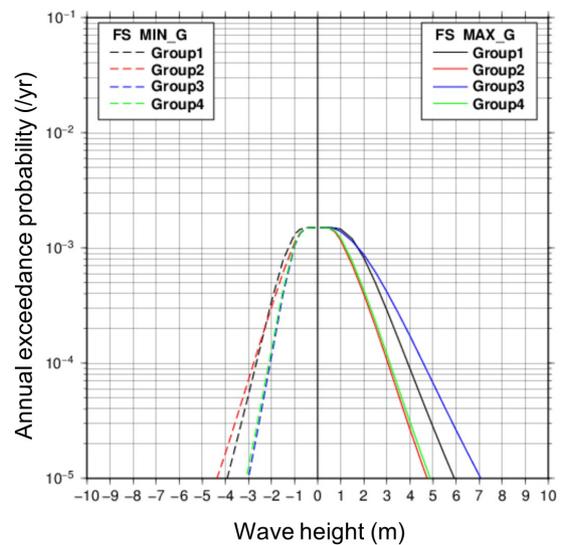


Fig. 6. Tsunami hazard for groups of wave parameters

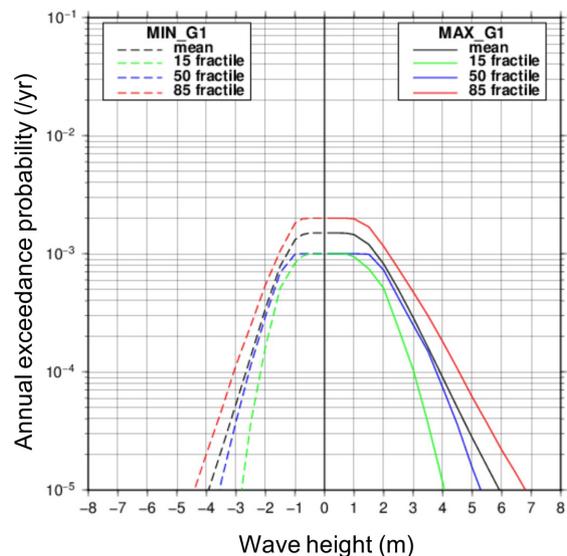


Fig. 7. Mean and fractile tsunami hazards curves for G1

5. 민감도 분석

확률론적 지진해일 재해도 분석은 다수의 입력변수가 가중치를 가지고 고려되기 때문에 각각의 입력변수가 가지는 불확실성을 민감도 분석을 통하여 제시하게 되어 있다. 따라서 본 연구에서도 지진해일 재해도 분석의 입력변수가 되는 최대잠재지진규모와 규모 분포, 재현주기, 지진해일 유발 단층 지진원의 경사각, 수치모의에 의한 편차 및 파고에 대한 확률분포의 절단값에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 개개의 변수가 전체 재해도에 미치는 영향을 분석하는 것으로, 분석 대상이 되는 변수에 대한 가중치 1로 하고 그 외의 다른 변수들에는 분석에 사용한 기준의 가중치를 그대로 적용하여 재해도를 계산하는 방법이 사용되었다.

Fig. 8 - Fig. 12은 파고변수 데이터 추출 그룹 1을 대상으로 민감도 분석을 통하여 도출된 각 입력변수들의 평균 재해도이다. Fig. 8은 최대잠재지진규모와 규모분포에 대한 민감도 분석 결과로서, $M_W 7.8 \pm 0.2$ (MR1), $M_W 7.8 \pm 0.1$ (MR2), $M_W 7.7 \pm 0.1$ (MR3), $M_W 7.9 \pm 0.1$ (MR4)에 대한 평균 재해도이다. 발생 가능한 최대 잠재지진의 규모와 고려된 규모 분포에 따른 차이를 보여주는 결과로서, 고려된 최대잠재지진의 규모가 클수록 발생 가능한 파고가 높아짐을 알 수 있다. 이는 파고변수를 도출하기 위한 수치모의에 사용된 단층 변수가 발생 가능한 최대잠재지진의 규모로부터 결정되기 때문으로 판단할 수 있다. Fig. 9는 지진의 재현주기에 대한 민감도 분석 결과로서, 500년 (R1)과 1000년 (R2)이 고려된 결과이다. 상대적으로 재현주기가 짧은 500년에 대한 재해도가 1000년에 대한 재해도보다 높은 연초과확률값을 나타내고 있으며, 발생 가능한 파고 역시 더 큰 것으로 나타나고 있다. 경사각에 대한 민감도 분석 결과가 Fig. 10으로 제시되었다. 30° (DIP1)와 60° (DIP2)의 경사각이 고려된 결과로서, 파고변수가 추출된 지점에 따라 약간의 차이가 존재했지만 Fig. 10으로 제시된 바와 같이 경사각에 따른 영향이 크게 나타나지는 않았다. Fig. 11은 수치모의에 의한 편차로서, 본 연구에서는 1.23 (BETA1), 1.35 (BETA2), 1.45 (BETA3), 1.55 (BETA4)의 값을 사용하여 재해도 분석을 수행하였다. 각 편차에 따른 재해도 계산 결과는 재해도의 연초과확률 수준은 동일하지만 발생 가능

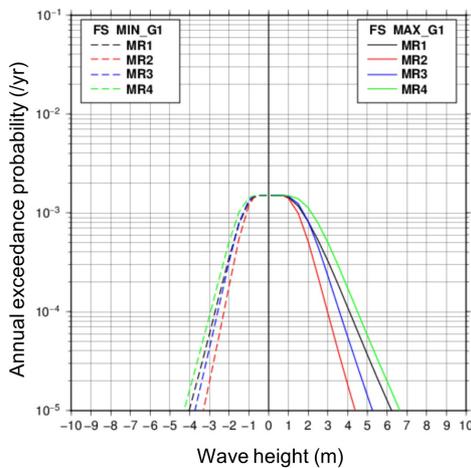


Fig. 8. Mean tsunami hazard curves for magnitude range (MR1: $M_W 7.8 \pm 0.2$, MR2: $M_W 7.8 \pm 0.1$, MR3: $M_W 7.7 \pm 0.1$, MR4: $M_W 7.9 \pm 0.1$)

한 파고의 높이가 달라지는 결과를 보였다. 이는 지진해일 재해도를 계산할 때 고려되는 파고의 확률분포함수에 대한 편차가 커짐에 따라 나타난 결과

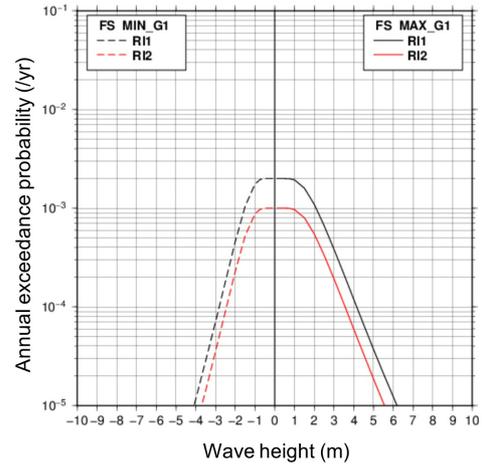


Fig. 9. Mean tsunami hazard curves for recurrence interval (R1: 500, R2: 1000)

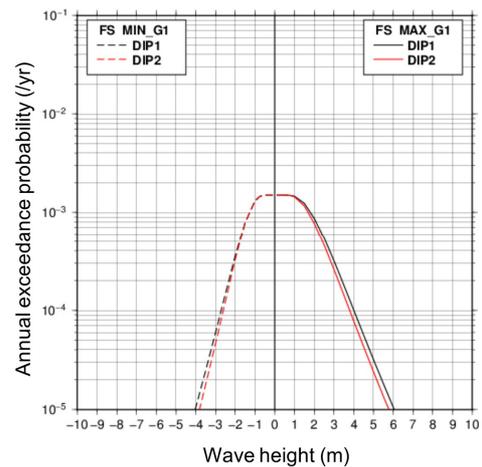


Fig. 10. Mean tsunami hazard curves for dip angle (DIP1: 30°, DIP2: 60°)

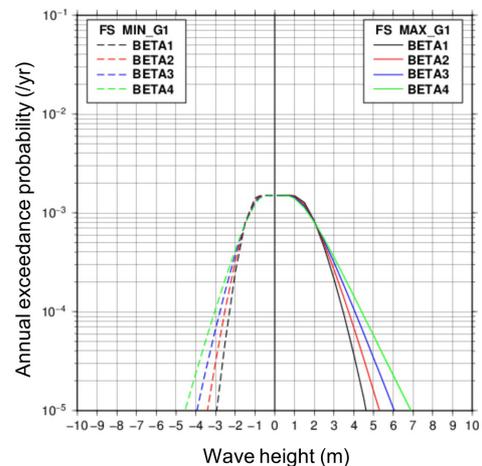


Fig. 11. Mean tsunami hazard curves for deviation by simulating (BETA1: 1.25, BETA2: 1.35, BETA3: 1.45, BETA4: 1.55)

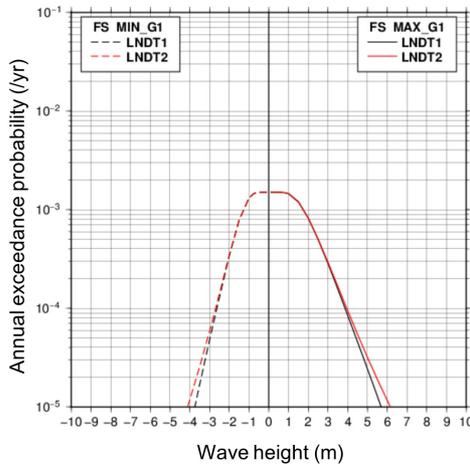


Fig. 12. Mean tsunami hazard curves for truncation of log-normal distribution (LNDT1: 2.3β, LNDT2: 10.0β)

로 판단되며, 수치모의에 의한 편차가 지진해일의 파고 수준에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 10은 확률분포의 절단 값에 대한 민감도 분석 결과로, 본 연구에서는 2.3β (LNDT1)와 10.0β (LNDT2)의 값이 사용되었다. 경사각과 마찬가지로 변수에 의한 차이가 크지 않은 것으로 나타났다으며, 상대적으로 보다 넓은 구간을 고려하는 10.0β를 이용한 재해도가 2.3β를 이용하여 계산된 재해도보다 크게 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 국내 원자력발전소 부지 중 한 곳을 대상으로 확률론적인 방법을 이용하여 지진해일 재해도 분석을 수행하였다. 이를 위하여 선행연구에서 연구 대상 부지에 대한 일본 서부 해안의 지진해일 유발 단층 지진원에 대한 정보를 이용하여 지진해일 수치모의를 수행하였으며, 수치모의를 통하여 도출된 파고를 바탕으로 지진해일 재해도 분석을 위한 파고 변수를 도출하였다. 도출된 파고 변수와 지진해일 유발 단층 지진원의 재현주기에 대한 정보를 바탕으로 울진 원자력 발전소 부지에 대한 지진해일 재해도 분석을 수행하였다. 지진해일 재해도는 단층 지진원에 의해 발생 가능한 파고의 확률밀도함수와 재현주기를 바탕으로 계산되었으며, 최대 파고와 최저 파고 준위에 따른 연초과확률로서 제시되었다. 또한 민감도 분석을 통하여 확률론적 지진해일 재해도 분석에 사용되는 입력변수의 재해도에 대한 영향을 분석하였다. 그 결과, 발생가능한 최대 잠재지진의 규모 및 그 범위와 수치모의에 의한 편차가 발생 가능한 파고의 수준에 영향을 미치며, 단층 재현주기가 연초과확률 수준에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 연구는 국내의 부족한 지진해일 유발 단층 지진원에 대한 정보를 대신하여 일본 원자력학회의 연구 결과에 기초하였다. 또한 선행된 지진해일 유발 단층 지진원에 대한 수치모의에서는 일본 원자력학회가 제시한 다수의 일본 서부해안 지진원들을 고려하여 파고 변수를 도출하였다. 하지만 본 연구에서는 확률론적 지진해일 재해도 분석에 대한 계산 과정과 민감도 분석에 초점을 두어 다수의 지진원에 대한 서술보다는 연구 대상 부지와 가장 가까운 하나의 지진원만을 고려하여 수행되었다. 이는 확률론적 지진해일 재해도 분석과 관련된 일련의 연구 과정을 함께 기술하고자 한 것으로, 확률

론적 지진해일 재해도 분석 방법에 대한 국내 적용 가능성을 보이고자 한 것이다. 따라서 본 연구를 통하여 제시된 지진해일 재해도가 연구 대상 부지에 대한 지진해일 재해도를 나타내지는 못한다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(원자력기술개발사업, No. 2012M2A8A4025 985)입니다.

/ REFERENCES /

- Geist EL, Parsons T, Probabilistic analysis of tsunami hazards, *Natural Hazards*, 2006; 37: 277-314.
- Korea Atomic Energy Research Institute, Probabilistic seismic hazard analysis procedure and application for nuclear power plant sites, KAERI/TR-4633/2012, Daejeon, Korea; c2012.
- Rhee HM, Seo JM, Sheen DH, Choi IK, Probabilistic seismic hazard analysis on Metropolitan cities and counties in Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 2012 Jun; 48(3):259-273.
- Rhee HM, Kim MK, Sheen DH, Choi IK, Analysis of uniform hazard spectra for Metropolis in the Korean Peninsula, *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2013 March; 17(2):71-77.
- Korea Electric Power Research Institute, Improvement of uncertainty in probabilistic seismic hazard analysis, TM,96NJ21,M1998,236, Daejeon, Korea; c1998.
- Korea Atomic Energy Research Institute, Sensitivity of input parameters in the PSHA for NPP sites, KAERI/TR-3931/2009, Daejeon, Korea; c2009.
- Seo JM, Rhee HM, Choi IK, A study on the best estimate of seismicity parameter b-value and its application for the seismic hazard analysis of the Korean Peninsula, *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2010 Feb; 14(1):35-42.
- Rhee HM, Seo JM, Choi IK, A study on the uncertainty of seismic hazard in the PSHA for a Korean NPP site, 10th Korea-Japan Probabilistic Safety Assessment workshop; 2009 May 18-20; Jeju, Korea.
- Choi BH, Efim P, Woo SB, Lee JW, Mun JY, Simulation of tsunami in the east sea using dynamically-interfaced multi-grid model, *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2003 Feb;7(1):41-55.
- Yoon SB, Lim CH, Active dispersion-correction scheme of 2-D finite element model for simulation of tsunami propagation, *Korean Society on Coastal and Ocean Engineers*, 2005 Mar;17(1):1-8.
- Choi BH, Efim P, Lee JS, Woo SB, Estimation of tsunami risk zoning on the coasts adjacent to the east sea from hypothetical earthquakes, *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2002 Oct;6(5):1-17.
- Lee H, Lee DS, Revaluation of tsunami risk at the site of Ulchin nuclear power plant, *Korean Society on Coastal and Ocean Engineers*, 2002 Mar;14(1):1-7.

13. Thio HK, Somerville P, Ichinose G, Probabilistic analysis of strong ground motion and tsunami hazards in Southeast Asia, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2007 Jun; 1(2): 1-19.
14. Annaka T, Satake K, Sakakiyama T, Yanagisawa K, Shuto N, Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts, *Pure and Applied Geophysics*, 2007; 164: 577-592.
15. Sakai T, Takeda T, Soraoka H, Yanagisawa K, *Proceeding of International Conference on Nuclear Engineering 14th*; 2006 Jul 17-20; Miami, Florida, USA; ASME; c2006.
16. Atomic Energy Society of Japan, Implementation standard concerning the tsunami probabilistic risk assessment of nuclear power plant: 2011, AESJ-SC-RK004E:2011, NISSEI EBLO INC., Tokyo, Japan; c2013.
17. Rhee HM, Kim MK, Seo JM, Sheen DH, Choi IK, Estimation of wave parameters for probabilistic tsunami hazard analysis considering the fault sources in the Western part of Japan, *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2014 May; 18(3):151-160.