

2004 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

확률론적 시나리오 지진 및 개별지진원의 공헌도 평가
Estimation of Probabilistic Scenario Earthquakes and Individual Seismic Source Contribution

최인길, 전영선

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

Masato Nakajima

Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan

연관희

한국전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원전 구조물 및 기기의 내진설계를 위한 설계지진의 설정에는 결정론적 방법이나 확률론적 방법이 사용되어 왔다. 최근에는 확률론적 지진재해도 분석이 일반화 되면서 확률론적으로 설계지진 및 평가용 지진의 설정 방법이 합리적인 방법으로서 인식되어 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 확률론적 지진재해도의 재분해를 통하여 확률론적 시나리오 지진을 산정하였으며 확률론적 지진재해도 분석에 사용된 개별 지진원의 지진재해도 공헌도를 평가할 수 있는 기법을 확립하고 국내 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석 결과를 이용하여 계산 예를 수행하였다.

ABSTRACT

The design earthquake used for the seismic analysis and design of NPP is determined by the deterministic or probabilistic methods. The probabilistic seismic hazard analyses(PSHA) for the nuclear power plant sites were performed for the probabilistic seismic risk assessment. The probabilistic method become a reasonable method to determine the design earthquakes for NPPs. In this study, as a sample calculation, the probability based scenario earthquakes were estimated by the de-aggregation of the probabilistic seismic hazard. Finally, the contribution of the individual seismic source to the seismic hazard was estimated using the seismic source map and seismic source parameters used in the PSHA.

1. 서론

구조물의 내진설계나 내진신뢰성 평가에 있어서는 지진하중의 설정으로부터 구조물 응답의 불확실성 평가 까지 각각의 단계에서 불확실성을 포함하고 있는 문제를 취급할 필요가 있다. 특히 지진동 및 지진하중은 큰 불확실성을 내포하고 있다. 지진동을 평가하는 방법으로는 단층모델에 기초하여 그 단층이 파괴될 경우에 임의 부지에 예상되는 지진동을 예측하는 방법과 부지 주변의 단층이나 진원역을 확률 모델로 평가하여 예상되는 평균적인 지진동을 예측하는 방법이 사용되고 있다.

후자의 방법을 확률론적 지진재해도 해석이라 부르며 지진의 발생으로부터 전파까지의 불확실성을 확률모델로 표현하는 것으로 이 발생확률을 나타내는 지표와 함께 정량적으로 평가하는 방법이다. 미국에서는 NRC가 1997년에 발표한 Regulatory Guide 1.165[1]에서 보는바와 같이 지진재해도를 확률론적으로 평가하도록 기술하고 있으며 이에 따라 진원의 모델화, 지진동 거리 감쇄식, 지진발생시계열 등 요소기술에 대해서도 새로운 연구가 많은 이루어지고 있다.

본 논문에서는 지진재해도 분석의 입력 자료를 이용하여 국내 원전부지의 지진재해도 평가를 수행하고 이를 재분해하여 지진재해도 분석에 사용된 진원역이 지진재해도에 미치는 공헌도를 평가할 수 있는 방법을 개발하고 이를 국내 원전 부지에 적용하여 평가하였다.

2. 확률론적 지진재해도 분석

확률론적 지진재해도 해석은 처음 Cornell[2]에 의해 이론적인 기초가 개발 제안되었다. 그 후 Der Kiureghian and Ang[3]등에 의해 해석방법이 개선되었으며 동시에 구조물의 내진설계나 지역의 지진방재에 있어서 입력지진동 평가에 이용되었다. 국내에서는 가동 중인 원전 및 신규 원전에 대한 확률론적 지진위험도 평가의 일환으로 대부분의 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석을 수행하여 왔다.

동일한 부지를 대상으로 하여도 전문가에 따라 진원의 모델화, 지진동 거리감쇄식의 선택은 다르기 때문에 재해도 해석의 결과가 다른 경우가 많다. 특히 진원의 모델화에 대해서는 현재까지도 전문가에 따라 의견이 다른 지진발생원이 존재하고 있다. 이와 같은 지진발생원이 근처에 존재하는 부지에의 지진재해도를 평가하는 경우는 재해도 해석 결과 자체에 포함된 불확실성을 평가하여 명시하는 것이 특히 필요하다. 그리고 진원의 모델화에 관한 불확실성은 단층모델에 기초한 지진동 예측방법에서도 공통적인 문제가 있다. 우리나라와 같이 강진기록이 거의 없고 매우 간략하게 기록된 역사지진 자료에 의해 지진원을 평가할 경우 전문가에 따른 편차 및 불확실성이 매우 크게 나타날 수 있다.

3. 지진재해도의 재분해

3.1 지진재해도 재분해 개념

종래의 지진재해도 해석방법에서는 지진동강도(최대가속도, 최대속도 등의 최대지진동

이나 응답 스펙트럼)와 년초과확률과의 관계를 나타낸 재해도곡선을 얻는다. 이러한 재해도 곡선은 년초과확률에 대응하는 지진동강도를 주지만 구조물의 동적해석에서 필요한 지진동의 주기특성, 지속시간 등의 정보를 직접 주지는 못한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 일본에서는 龜田, 石川 등에 의해 “확률론적 시나리오 지진[4,5]”의 개념이 개발되었으며 미국에서는 McGuire에 의해 “Beta Earthquake[6]”가 거의 동시에 개별적으로 제안되어, 그 후 U.S. NRC에 의해 “Controlling Earthquake”[1]가 제안 되었다. 이러한 방법을 재분해(De-aggregation or Dis-aggregation)라고 부른다.

3.2 확률론적 시나리오 지진

龜田, 石川은 확률론적 지진재해도 해석과 시나리오지진이라고 하는 종래 별개의 지진 하중 평가방법을 통합하여 확률론적 시나리오지진을 설정할 수 있는 방법론을 제안하였다[4,5]. 이 방법은 부지 주변의 지진발생 모델을 설명하면 재현기간에 대응하는 지진의 제원(규모 기대치 \bar{M} , 진앙거리 기대치 $\bar{\Delta}$, 진앙방위 기대치 $\bar{\Theta}$)이 산출되며 나아가 각 지진발생원의 공현도라고 하는 새로운 개념을 도입한 것으로 공현도에 대응하는 부지에 대한 복수의 시나리오지진을 설정할 수 있는 특징이 있다. 확률론적 시나리오지진의 제원(규모, 진앙거리 등의 조건부 기대치 등)은 부지에서 임의 강도 이상의 지진동이 발생하는 조건하에서 설정한 지진재해도 모델로부터 다음 식에 의해 구할 수 있다[4,5,7,8].

$$\bar{M}(P_0) = \frac{\sum_{k=1}^n E_k(M|Y \geq y(p_0)) \cdot w_k(p_0)}{\sum_{k=1}^n w_k(p_0)} \quad (1)$$

$$\bar{\Delta}(P_0) = \frac{\sum_{k=1}^n E_k(\Delta|Y \geq y(p_0)) \cdot w_k(p_0)}{\sum_{k=1}^n w_k(p_0)} \quad (2)$$

$$\bar{\Theta}(P_0) = \frac{\sum_{k=1}^n E_k(\Theta|Y \geq y(p_0)) \cdot w_k(p_0)}{\sum_{k=1}^n w_k(p_0)} \quad (3)$$

여기서 $w_k(p_0)$ 는 지진발생원 k 에서 발생하는 지진 중에서 부지에 $y(p_0)$ 이상의 지진동을 발생시키는 지진의 년 발생률을 나타낸다.

공현도 $C_k(p_0)$ 는 부지에서 임의 강도레벨 $y(p_0)$ 이상의 지진동이 발생한 경우에 그 지진동이 지진발생원 k 에서 발생했는가를 나타내는 조건부 확률로서 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$C_k(p_0) = \frac{w_k(p_0)}{\sum_{k=1}^n w_k(p_0)} \quad (4)$$

공현도는 대상으로 하는 지점에 임의의 강도 $y(p_0)$ 이상이 되는 지진동을 발생시키는 지진발생원의 할합을 나타내며 각 지진발생원 마다의 공현도는 재해도 수준에 대하여 당연히 변화한다. 지진재해도를 평가할 때 주목하는 재해도 수준에서 공현도가 큰 지진발생원이 중요하며 확률론적 시나리오지진은 공현도의 값에 의해 순위가 설정되는 특징을 가지고 있다.

4. 국내 원전부지에 대한 평가 예

국내 원전부지에 대한 기존의 확률론적 지진재해도 입력 자료를 이용하여 시나리오 지진 및 공현도 평가 예를 수행하였다. 월성 원전 부지를 대상으로 과거 원자력연구소에서 수행한 확률론적 지진재해도 분석의 입력 자료로 사용된 지진 구역도를 사용하였다. 그림 1에 본 계산 예에서 사용한 지진 구역도를 보여주고 있다[9]. 그림에서 보는 바와 같이 우리나라의 지진원을 총 7개의 랜덤 지진역으로 설정하였으며 각각의 지진원에 대한 파라메타 및 최대 규모는 표 1과 같다. 표에서 a_0 와 b_0 는 Gutenberg-Richter 식에서의 상수값을 나타낸다. 또한 이 지진원 모델에서 고려한 최소 지진규모는 3.8을 사용하였다.

지진재해도 분석에 사용된 지반운동 감쇄식 역시 과거의 연구에서 사용된 것으로 지진 전문가에 의해 제시된 것이다[9,10]. PGA(Peak Ground Acceleration)에 대해 제시된 지반운동 감쇄식은 다음과 같으며 이 식에서의 지진 규모, 진앙거리 및 최대지반가속도의 관계를 그림 2에 나타내었다..

$$\ln PGA (cm/sec^2) = 0.4 + 1.2M - 0.76 \ln M - 0.76R - 0.0094R \quad (1)$$

여기서, PGA : 최대지반가속도

M : 지진의 규모

R : 진원거리 (km) ($= \sqrt{R_{epi}^2 + 10^2}$)

R_{epi} : 진앙거리 (km)

이상의 지진구역도 및 지반운동 감쇄식을 이용하여 해석한 지진재해도 해석결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 10^{-3} 년초과확률에서의 최대지반가속도는 140 gal로 나타났으며 년초과확률이 감소함에 따라 최대지반가속도가 급격히 증가하여 US NRC에서 제시하고 있는 참조확률[1]인 10^{-5} 에서는 1000gal이 넘는 것으로 나타났다.

이들 값은 과거에 수행한 여러 전문가 그룹에 의한 확률론적 지진재해도에서의 결과 [9] 보다 매우 크게 나타나는 것으로 전문가에 따라 동일한 지역이라 하더라도 지진구역도 및 지진원에 대한 평가가 상이하기 때문에 발생하는 것이다.

표 1. 지진역 모델에 대한 지진 파라메타

Source ID	Seismicity Parameters		Maximum Magnitude
	a_0	b_0	Value
Source 1	4.28	1.12	7.1
Source 2	3.53	0.92	7.4
Source 3	2.59	0.69	7.6
Source 4	2.34	0.66	7.2
Source 5	3.10	0.87	7.6
Source 6	2.12	0.66	7.2
Source 7	1.70	0.59	7.7

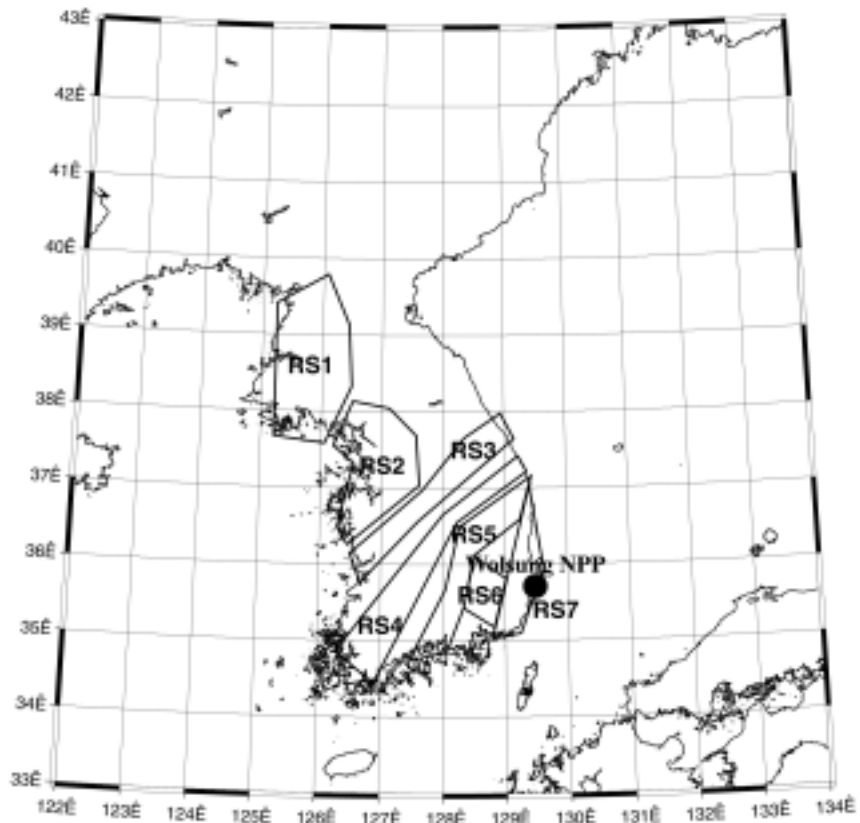


그림 1. 지진구역도

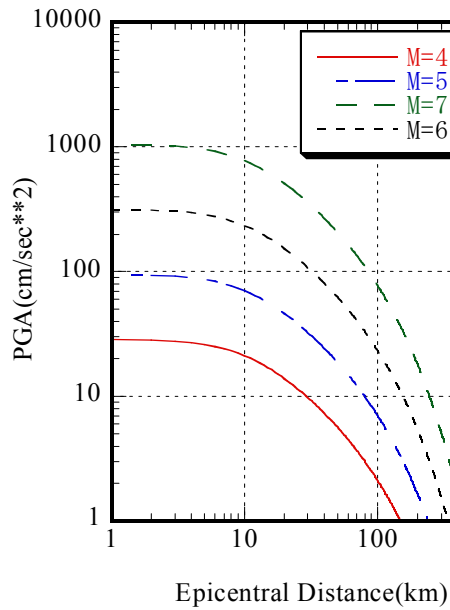


그림 2. 지진동 거리 감쇄식의 특성

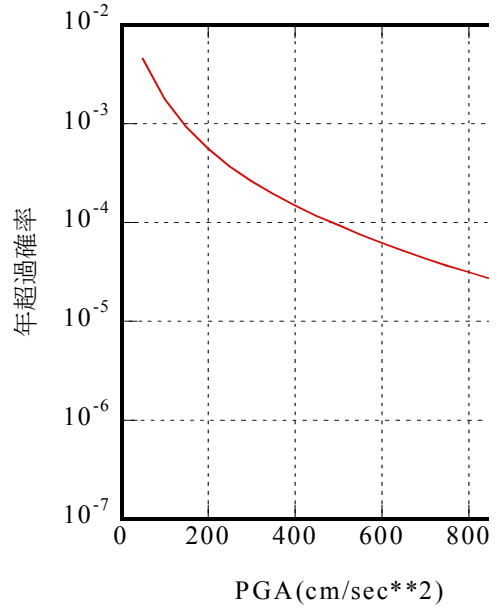


그림 3. 재해도곡선

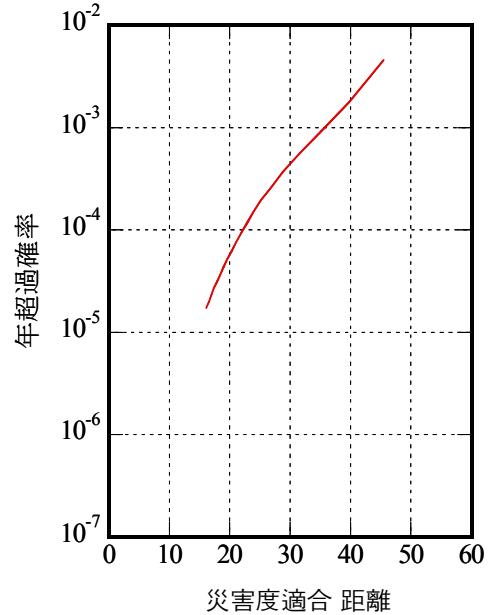
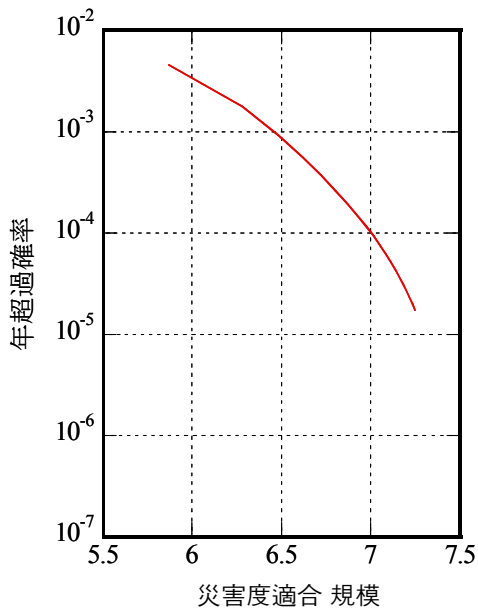


그림 4. 확률론적 시나리오 지진

그림 4에는 확률론적 지진재해도의 재분해를 통하여 산정한 확률론적 시나리오 지진을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 10^{-3} 년초과확률에서의 시나리오 지진의 규모 및 거리는 M6.5, 35km로 나타났다. 또한 NRC의 참조확률 10^{-5} 에서는 M7.3, 13km 정도로 매우 크게 나타났다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 전문가가 제시한 하나의 지진구역도 및 지반운동 감쇄식을 사용하여 산정한 예로서 다른 전문가에 의해 제시된 지진구역

도 및 지반운동 감쇄식을 사용할 경우 매우 다른 결과를 줄 수 있다. 본 연구에서는 확률론적 시나리오 지진의 작성기법을 확립하고 작성 예를 보여주기 위해 일부 전문가의 한정된 자료를 사용하여 작성한 것이다. 이와 같은 확률론적 시나리오 지진의 작성을 위해서는 좀 더 객관적이고 전문가들의 의견이 집결된 지진구역도 및 지반운동 감쇄식의 개발이 필요하다.

그림 5에서는 지진구역도 상의 각 지진원이 지진재해도에 미치는 공헌도를 그림으로 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 10^{-3} 년초과확률에서 지진재해도 공헌도는 7번 지진원이 약 82% 가 되며 6번 지진원의 경우 약 15%, 나머지는 5번 지진원이 공헌하고 있는 것으로 나타났다. 10^{-3} 이상의 년초과확률에서는 7번 지진원만이 재해도에 공헌하는 것으로 나타났다. 또한 1 ~ 4번 지진원의 경우 지진재해도에 공헌도가 거의 없는 것으로 나타났다.

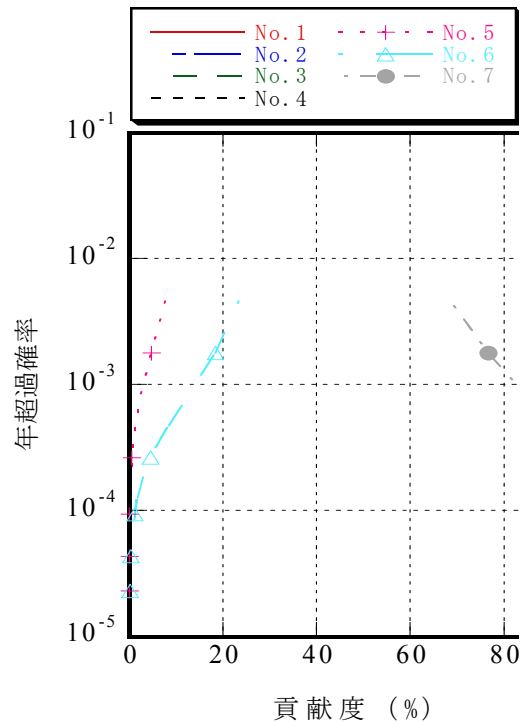


그림 5. 각 지진발생원별 공헌도

5. 결론

본 연구에서는 국내 원진 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석 결과를 재분해하여 확률론적 시나리오 지진 및 개별 지진원의 공헌도를 산정하는 기법을 확립하고 계산 예를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

일본에서 개발된 지진재해도 및 재분해 방법에 의해 확률론적 지진재해도 평가 및 시나리오 지진작성 방법을 이용할 경우 다양한 시나리오 지진의 작성이 가능하며 특히 개별 지진원이 지진재해도에 미치는 공헌도의 산정이 가능하다. 따라서 추후 개별 단층 등

의 개별 지진원이 추가될 경우 전체적인 지진재해도에 미치는 영향을 쉽게 파악할 수 있으며 개별지진원에 대한 세부 평가가 가능하다.

본 연구에서 제시한 방법을 사용하여 국내 원전 부지에 대한 확률론적 시나리오 지진을 산정하기 위해서는 지진구역도 및 개별 지진원에 대한 객관적이고 합리적인 평가가 선행되어야 하며 국내 지질·지진 특성에 맞는 지반운동 감쇄식의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. US NRC Regulatory Guide 1.165, Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, 1997.
2. Cornell, C.A., "Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of Seismological Society of America," Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
3. Der-Kiureghian, A. and A. H-S. Ang, "A Fault Rupture Model for Seismic Risk Analysis," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 67, No. 4, pp. 1173-1194, 1977.
4. 龜田弘行, 石川 裕, "ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析の擴張," 土木學會論文集, No. 392/I-9, 1984.
5. 龜田弘行, 石川 裕, 中島正人, "確率論的想定地震の概念と應用," 土木學會論文集, No. 577/I-41, 1997.
6. J. Hirose, K. Muramatsu, T. Okumura, and S. Taki, A Procedure for the Determination of Scenario Earthquakes for Seismic Design Based on Probabilistic Seismic Hazard Analysis, JAERI-Research 2002-009, 2002.
7. K. Muramatsu and J. Hirose, "The Use of Seismic Hazard Analysis for Determining Scenario Design Earthquakes - An Overview of a Recently Completed Work at JAERI -," Proceedings of the Seventh Korea-Japan Joint Workshop on Probabilistic Safety Assessment, 2002.
8. McGuire, R.K., "Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes : Closing the Loop," Bulletin of Seismological Society of America, Vol.85, No.5, pp.1275-1284, 1995.
9. 서정문, 민경식, 전영선, 최인길, 지진재해도 평가의 불확실성 개선에 관한 연구, KAERI/CR-65/99, 1999.
10. Baag, Chang-Eob, Chang, Sung-Joon, Jo, Nam-Dae and Shin, Jin-Soo : Evaluation of Seismic hazard in the southern part of Korea, Proceeding of the 2nd International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Region of Moderate Seismicity, Nov. 1998.