

확률론적 방법에 의한 국내 원전 부지의 제어지진 결정에 대한 기초 연구

A Preliminary Study on the Probabilistic Determination of Controlling Earthquakes for Nuclear Power Plant Sites in Korea

노명현*

임창복*

이성규**

Noh, Myunghyun

Im, Chang-Bok

Lee, Sung-Kyu

요약

확률론적 방법을 적용하여 국내의 4개 원전 부지의 설계지진을 분석하였다. 본 연구에서 사용된 방법은, 지금까지 원전 부지의 안전성 분야에서 적용되어 왔던 기존의 확률론적 재해도분석과는 다른 새로운 방법으로서, 기준확률의 분석과 제어지진의 결정을 위한 지진재해도 분해의 두 과정으로 구성된다. 분석에 사용된 지진원과 지진활동 특성값은 기존의 확률론적 지진재해도 분석에 사용되었던 입력자료이다. 이로부터 계산된 기준확률은 스펙트럼 가속도 감쇄식에 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 기준확률 1.0×10^{-5} 에 대하여, 4개 원전 부지의 제어지진은 평균거리가 13~26 km, 평균 규모가 5.7~6.1 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 이 값은 단지 현재의 입력 자료에 근거하였을 때의 결과로서, 값 자체의 수치적인 의미보다는 전체적인 분석 과정을 검토하고 또한 현재의 입력자료와 새로운 방법이 조합되었을 때 산출되는 결과의 대략적인 수준을 파악하는 데 더 큰 의미가 있다.

1. 서 론

본 논문에서 확률론적 방법은 확률론적 지진재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis; PSHA)을 의미한다. PSHA의 최대 장점은 지진 현상에 대한 여러 가지 다양한 모델을 체계적으로 통합할 수 있다는 데 있다. 또한 각각의 모델과 그에 부여된 가중치를 조합함으로써 분석 결과에 대한 불확실성을 추정할 수 있으므로, 지진 현상에 내재된 불확실성을 효과적으로 반영할 수 있다. PSHA의 단점은 설계지진에 대한 개념의 결여이다. PSHA에서 개개의 지진(원)의 효과는 부여된 가중치를 통하여 전체에 통합되므로, 그 영향은 전체 분석 결과에 묻혀 명백히 드러나지 않는다. 따라서 부지의 지진 효과를 가장 적절히 표현할 수 있는 한 개의 대표지진(=설계지진)을 제시하는 데 효과적이지 못하다. PSHA의 이러한 단점은 바로 PSHA의 최대 장점인 '통합성'에 기인한다. PSHA에 대한 최근의 연구([1], [2])에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 최빈 지진(Modal Earthquake)의 개념이 도입되었다. 최빈지진을 구하기 위하여는 전체 지진재해도를 지진(원)의 거리 및 규모 구간 별로 다시 분해하는, 이른바 지진재해도 분해가 필요하다.

* 한국원자력안전기술원, 선임연구원

** 한국원자력안전기술원, 책임연구원

미국의 원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission)는 자국의 원자력 규제법의 개정을 통하여 PSHA에 의한 설계지진의 결정을 허용하였으며([3]), 이에 따른 PSHA의 절차([4])도 함께 마련하였다. 이 절차서에도 설계지진으로서 최빈지진이 이용된다. 최빈지진은 참고문헌 [1]과 [2]에서 처럼 지진재해도 분해를 통하여 결정되나, 계산 방법이 참고문헌 [1], [2]에서 제시된 바와는 상이하며 이를 또한 제어지진(Controlling Earthquake)으로 불린다. 제어지진과 더불어 안전성에 대한 판단기준으로서 기준확률(Reference Probability)의 개념도 함께 제시되어 있다.

본 연구에서는 미국 원자력규제위원회에서 작성한 PSHA 절차([4])에 따라 국내 원전 부지의 설계지진을 분석하였다. 본 연구의 주목적은 PSHA에 의한 설계지진 결정 방법을 국내에 소개하는데 있으며, 분석을 위하여 별도의 PSHA 입력자료를 구성하지 않았다. (입력자료에 대하여는 2.1절에서 다시 논의될 것이다.) 따라서 본 논문에 제시된 결과는 그 자체로써 국내 원전 부지의 안전성에 대한 척도를 나타내는 것이 아니며, 다만 새로운 PSHA를 적용하였을 때의 산출되는 결과의 대략적인 수준을 파악함으로써 향후 이 방법의 국내 적용에 대한 기초 자료로써 활용될 수 있다.

2. 본 론

2.1 PSHA 입력자료

PSHA 입력자료는 지진원과 지진동 감쇄식으로 구성된다. 지진원은 다시 개개의 지진원의 기하학적 특성 및 분포를 나타내는 지진원도(Seismic Source Map)와 지진원의 지진 특성을 나타내는 여러 가지 변수(최대/최소 지진, Richter-b 값, 연평균 지진발생률 등)로 구성된다. 일반적으로 PSHA 입력자료는 다수의 관련분야 전문가들로부터 도출된다. 이때, 각 전문가는 2개 이상의 복수 모델을 가중치와 함께 제시할 수 있으므로, 모든 모델을 조합하였을 때의 입력자료의 수는 수십 개에서 수 천 개에 이른다.

본 연구에 사용된 PSHA 입력자료는 국내 원전 부지의 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake)의 확률론적 분석 시 사용되었던 자료로써, 5인의 국내 지진전문가가 제시한 자료이다. 이 입력자료에서 지진동 감쇄식은 최대지반가속도에 대한 감쇄식이 제시되었으나, 새로운 PSHA에는 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration)에 대한 감쇄식이 사용되므로, 지진원 자료만이 본 연구에 이용되었다. 각각의 지진원도에 대하여 가중치가 가장 큰 지진 특성 변수만을 사용한 결과 총 8개의 지진원 입력자료가 구성되었다.

2.2 기준확률

참고문헌 [4]는 PSHA에 의하여 결정된 설계지진의 보수성에 대한 정량적인 판단 기준으로서 기준확률(Reference Probability)을 도입하였다. 기준확률은 결정론적 방법을 적용하여 설정된 기존 발전소의 설계지진에 대한 초과확률로부터 계산되므로, 여기에는 기존 발전소의 설계지진이 충분히 보수적이라는 가정이 선행된다. 기준확률의 결정절차는 다음과 같다.

- (1) 각 원전 부지의 설계지진에 대응하는 설계 응답스펙트럼으로부터 5 Hz 및 10 Hz의 스펙트럼 가속도를 읽는다.
- (2) PSHA로부터 각각의 스펙트럼 가속도에 대한 중앙값 초과확률(p_5, p_{10})을 계산한다.
- (3) 합성확률($= p_5/2 + p_{10}/2$)을 계산한다.
- (4) 각 원전 부지의 합성확률 분포에서 중앙값을 해당 지역의 기준확률로 취한다

위의 절차에 따라, 미국 중부 및 동부 지역에 대하여는 중앙값 초과확률 $1.0 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 이 기준확률로써 결정되었다([3], [4]).

국내 4 곳의 원전 부지의 설계지진 값은 0.2 g로서 모두 동일하다. 월성 원전을 제외한 나머지 3 곳에 적용된 설계 응답스펙트럼은 Regulatory Guide 1.60 ([5])이다. 이 설계 응답스펙트럼으로

부터 설계지진 0.2 g에 대응하는 5 Hz 및 10 Hz 스펙트럼 가속도는 각각 556 gal(=cm/sec²) 및 473 gal이다. 비록 월성 원전에 적용된 설계 응답스펙트럼은 Regulatory Guide 1.60과 다르지만, 본 연구에서는 편의상 같은 것으로 가정하였다. 한편, 적용된 스펙트럼 가속도 감쇄식은 참고문헌 [6]과 [7]에 제시된 감쇄식이다. 이들 감쇄식은 실제 관측된 값으로부터 유도된 것이 아니고 지진학적 모델에 근거한 모의 지진으로부터 유도된 것이므로, 표준편차가 제시되지 않았다. 금번 계산에서는 감쇄식의 표준편차로 $\sigma=0.5$ 를 일률적으로 적용하였다. 국내 4개 원전 부지의 설계 지진에 대한 합성확률을 감쇄식 별로 도표 1에 정리하였다. 마지막 열은 4개 부지의 합성확률의 중앙값으로서 기준확률에 해당된다.

도표 1. 국내 원전 부지의 합성확률 및 중앙값

감쇄식*	합성확률 (표준편차)				중앙값**
	부지 1	부지 2	부지 3	부지 4	
감쇄식 1	6.434E-07 (5.305E-07)	4.698E-06 (3.723E-06)	4.359E-06 (3.648E-06)	1.784E-06 (1.483E-06)	3.072E-06
감쇄식 2	2.745E-05 (1.324E-05)	9.431E-05 (5.762E-05)	7.930E-05 (5.580E-05)	6.489E-05 (4.103E-05)	7.210E-05

* 감쇄식 1, 2는 각각 참고문헌 [6], [7]에 제시된 감쇄식임.

** 4개 부지의 합성확률의 중앙값으로서 기준확률에 해당됨.

도표 1로부터 감쇄식이 PSHA 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 중앙값에 대하여 그 차이는 20 배가 넘는다. 각 부지의 합성확률에 수반된 표준편차도 매우 크다. 표준편차는 각 전문가가 제시한 PSHA 입력자료의 차이에 기인한다.(통계적 이상 값의 처리를 위한 별도의 통계처리 기법은 시도되지 않았다.) 이 결과는, 향후 국내 원전 부지의 설계지진에 대한 신뢰성 있는 PSHA를 위하여 감쇄식을 비롯한 지진 입력자료의 분석이 선행되어야 함을 시사한다.

2.3 제어지진

개념적인 측면에서 해석할 때, 제어지진은 주어진 기준확률(재해도)에 공헌도가 가장 큰 지진의 평균 거리 및 평균 규모이다. 일반적으로 제어지진은, 같은 부지에서 같은 PSHA 입력자료를 사용하더라도 기준확률의 값에 따라 어느 정도 변하므로, 제어지진의 분석을 위하여는 먼저 기준확률이 결정되어야 한다. 2.2절에서 두 개의 감쇄식에 대한 기준확률이 계산되었으나 이보다는 미국 중부 및 동부 지역에 적용되는 기준확률인 1.0×10^{-5} 을 적용하였다. 감쇄식 1([6])만이 제어지진 분석에 이용되었다.

전술한 바와 같이, 제어지진을 결정하기 위하여는 기준확률을 지진(원)의 거리 및 규모 별로 분해하여야 한다. 평균 거리 및 평균 규모는 분해된 재해도(초과확률)와 해당 거리 및 규모를 조합한 가중평균(Weighted Average)이다. 가중평균을 계산하는 데 있어 세부적인 방법은 학자들 간에 상이하다. 가중평균 계산 방법뿐만 아니라 재해도 분해에 사용된 거리 및 규모의 구간 크기(Interval Size)도 제어지진에 영향을 준다. 본 논문에서 사용된 제어지진 결정 방법은 참고문헌 [4]를 따랐다.

국내 원전 부지의 지진재해도(5 Hz 및 10 Hz의 평균) 분해의 예로써, 부지 1의 지진재해도 분해 결과를 도표 2에 정리하였다. 금번 분석에 사용된 모든 지진원의 규모는 5.0~7.0 사이이다. 따라서 마지막 열의 재해도 0.000은 규모 7.0 이상의 지진이 발생하지 않기 때문이다. 반면에 끝

에서 두 번째 열의 재해도 0.000은 규모 6.5~7.0 사이의 지진이 발생하기는 하나, 그 발생확률이 극히 작거나 또는 큰 지진을 발생시키는 지진원이 부지로부터 매우 멀리 떨어져 있음을 의미한다. 마지막 행의 첫 번째 열에는 100 km 이상 떨어진 원거리 지진원의 효과를 나타낸다.

참고문헌 [4]의 절차에 의하면, 1 Hz 및 2.5 Hz에 대한 지진재해도의 평균에서 100 km 이상 떨어진 지진원의 공헌도가 5 %를 초과할 때에는 100 km 이상의 거리 구간에 대한 제어지진을 별도로 계산하여야 한다. 이 경우 부지의 제어지진(1 Hz 및 2.5 Hz)은 2개가 정의된다. 이들은 각각 고주파 및 저주파 영역에서의 부지 응답스펙트럼의 모양을 결정하는데 이용된다.

도표 2. 정규화된 지진재해도(5 Hz 및 10 Hz) 분해 결과의 예

거리 구간(km)	규모 구간				
	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	> 7
0-15	7.049E-02	1.904E-02	6.800E-02	0.000	0.000
15-25	4.390E-02	7.856E-02	3.948E-01	0.000	0.000
25-50	1.930E-02	4.881E-02	2.552E-01	0.000	0.000
50-100	6.308E-05	1.408E-03	4.209E-04	0.000	0.000
100-200	0.000	1.918E-07	8.118E-06	0.000	0.000
200-300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
> 300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

분석 결과, 4개 부지 모두에 대하여 원거리 지진의 공헌도가 5 % 미만으로 나타났다. 따라서 각 부지에 하나의 제어지진(5 Hz 및 10 Hz 평균)만이 결정되었다. 각 부지에 대하여 새로 결정된 제어지진을 기존의 설계지진과 함께 도표 3에 정리하였다. 부지 2, 3 및 4의 설계지진은 부지 바로 밑까지 이동된 지리산 지진이다. 반면에, 부지 1의 설계지진은 황해에서 발생한 지진에 의하여 결정되었으며, 이 때 황해지진은 부지에서 90 km 떨어진 지점까지 이동되었다. 부지 1을 제외한 나머지 3개의 부지에서, 제어지진과 설계지진의 차이는 규모에서 1.0~1.1, 거리에서 13~77 km 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 부지 1의 경우, 제어지진과 설계지진과의 차이는 규모에서 1.0, 거리에서 77 km 차이가 난다.

도표 3. 제어지진과 설계지진

부지 번호	제어지진		설계지진	
	규모	거리*(km)	규모	거리*(km)
1	5.74	22.8	6.75	90
2	5.99	14.0	5.0	0
3	5.96	13.2	5.0	0
4	6.05	25.5	5.0	0

* 진앙거리

3. 토 론

미국 원자력규제위원회가 제시한 참고문헌 [4]의 PSHA 절차에 따라 국내 원전 부지에 대한 기준확률 및 4개 원전 부지의 제어지진을 분석해 보았다. 기준확률은 스펙트럼 가속도의 감쇄식에 매우 민감한 것으로 나타났으며, 기준확률에 수반된 불확실성(표준편차)도 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 지진동 감쇄식을 포함한 PSHA 입력자료에 대한 보다 신뢰성 있는 분석이 PSHA에 의한 설계지진의 평가에 선행되어야 함을 시사한다. 기준확률 $1.0 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 에서 국내 4개 원전 부지의 기존 설계지진과 새로 평가된 제어지진 사이에는 어느 정도 차이가 있는 것으로 나타났다. 금번 분석에 사용된 PSHA 입력자료 내에서 볼 때, 부지 1의 설계지진은 나머지 3개 원전 부지에 비해 일관성 작은 것으로 판단된다. 그러나 이 점이 부지 1의 설계지진이 덜 보수적임을 의미하지는 않는다. 제어지진 결정 시 도표 2의 거리 구간 및 규모 구간에 따라 지진재해도를 분해하였으나, 이들 구간의 크기도 제어지진에 영향을 미칠 수 있다. 이는 분해된 지진재해도의 거리 및 규모에 대한 해상도의 문제이다. 예를 들면 참고문헌 [2]의 경우, 규모 구간 0.1, 거리 구간 5 km를 사용하였다. 적절한 구간의 설정 역시 향후 PSHA의 적용을 위하여 연구가 필요한 항목이다.

마지막으로, 지진동 감쇄식의 불확실성(표준편차)에 대하여 언급하고자 한다. 지진동 감쇄식 및 이에 수반된 불확실성은 기준확률 및 제어지진 모두에 영향을 미친다. 금번 분석에 사용된 감쇄식 1 및 2는 실제 관측된 값으로부터 유도된 식이 아니고 지진학적 모델에 근거한 모의 지진으로부터 유도된 식이므로, 표준편차가 제시되지 않았다. 이로 인하여 두 식 모두에 $\sigma=0.5$ 를 일괄적으로 부여하였다. 지진동 감쇄식이 국내의 PSHA에 미치는 영향은 참고문헌 [8]에서 분석된 바 있다. 이 연구에 의하면, 지진재해도의 변화는 $\ln \sigma$ 의 변화에 매우 민감하다. 보다 신뢰성 있는 지진동 감쇄식의 추정을 위하여는 많은 강지진동 자료가 필요하나, 이는 현재의 국내 지진활동에 비추어 볼 때 많은 어려움이 있다.

참고문헌

1. M. C. Chapman(1995), "A Probabilistic Approach to Ground-Motion Selection for Engineering Design," Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, No.3, pp.937-942.
2. R. K. McGuire(1995), "Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop," Bull. Soc. Am., Vol.85, No.5, pp.1275-1284.
3. U. S. Nuclear Regulatory Commission(1994), "Proposed revisions to 10 CFR Part 100 and 10 CFR Part 50, and new appendix S to 10 CFR Part 50," SECY-94-194.
4. U. S. Nuclear Regulatory Commission(1995), "Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion," Draft Regulatory Guide DG-1032.
5. U. S. Nuclear Regulatory Commission(1973), "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants," Regulatory Guide 1.60.
6. M. Noh, and K. Lee(1995), "Estimation of Peak Ground Motions in the Southeastern Part of the Korean Peninsula (II): Development of Predictive Equations," Jour. Geol. Soc. Korea, Vol.31, No., pp.175-187.
7. D. M. Boore, and G. M. Atkinson(1987), "Stochastic Prediction of Ground Motion and Spectral Response Parameters at Hard-Rock Sites in Eastern North America," Bull. Seism. Soc. Am., Vol.77, No.2, pp.440-467.
8. 노명현, 김연중(1996), "한국의 지진재해도 곡선의 민감도 분석," 대한지질학회, 제32권 3호, pp.199-207.