

# 월성 원전 부지의 등재해도 스펙트럼 계산

## Computation of Uniform Hazard Spectrum for Wolsong Nuclear Power Plants.

신진수\*,  
Shin, Jin Soo

이종림\*\*,  
Lee, Jong-Rim

정의호\*\*\*  
Jeong, Eui Ho

### ABSTRACT

The uniform hazard spectrum of Wolsong Nuclear Power plant Site is computed in order to estimate probabilistically the characteristics of spectral ground response. The spectral hazard values calculated from the seismic zoning maps proposed by eight seismologist are combined with equal weight to produce a uniform hazard spectrum. The uniform hazard spectra corresponding to reference probabilities of  $1.0 \times 10^{-4}$ /year and  $1.0 \times 10^{-5}$ /year are presented, which largely depend on the spectral attenuation relation. The computational results of this study contribute to verify the conservatism of the design ground spectrum of Wolsong Nuclear Power Plant.

### 1. 서론

원자력발전소의 내진설계는 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake: SSE)과 부지의 지반운동 증폭특성에 의해 결정되는 응답스펙트럼에 기반을 두고 있다. 따라서 원전의 내진 안전성은 설계 기준 응답스펙트럼의 보수성과 밀접한 관계를 지니고 있다. 원자력발전소 건설에는 가능한 그 지역에서 관측된 강지진동 운동을 근거로 한 부지고유 내진설계 응답스펙트럼을 사용할 것을 권유하고 있다. 이는 원전 주변의 지질 및 지진학적 특징을 최대한 반영하여 원전의 안전성을 도모하고자 하는 것이다. 하지만 우리나라에서는 아직까지 원전 부지의 고유응답스펙트럼이 개발되어 있지 않기 때문에 미국이나 캐나다에서 개발된 내진설계 응답스펙트럼을 원전 건설에 이용하고 있다. 특히 월성 원전은 캐나다의 CAN3-N289.3에 제시된 응답스펙트럼을 사용하였는데 이 역시 월성 원전이 위치한 경상분지의 지질 및 지진 활동 특성을 반영하여 개발된 것이 아니기 때문에 이에 대한 안전성 평가가 필요하다.

이번 연구에서는 이와 같은 이유에서 월성원전의 내진설계기준 응답스펙트럼 안전성 평가를 위하여 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum) 계산을 수행하였다. 이는 한반도의 지진활동 정도를 반영하여 월성 원전 부지의 응답특성을 예측하는 것으로 계산 결과에는 확률의 개념이 포함되어 있다. 등재해도 스펙트럼의 계산 결과는 월성 원전의 내진 안전성 확인뿐만 아니라 향후 새로운 부지고유 내진설계 응답스펙트럼 개발에 유용한 사전 정보를 제공할 수 있을 것이다.

\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정회원

\*\*\* 한국전력공사 전력연구원 일반연구원, 정회원

## 2. 등재해도 스펙트럼 계산 방법

등재해도 스펙트럼의 계산은 확률론적 지진재해도 분석(PSHA)과 유사한 과정을 거친다. PSHA가 지반의 최대 가속도(PGA)에 대응하는 초과확률을 계산하는 것인 반면에 등재해도 스펙트럼은 각 고유주파수 ( $f_N$ )에 따른 지반 응답 가속도의 초과확률을 계산하여 스펙트럴 지진재해도 곡선을 만들고 여기서 기준 확률 값에 대응하는 가속도 값을 역산하여 구하게 된다.

확률론적 재해도 분석에는 크게 두 종류의 계산 방법이 사용된다. 첫 번째는 대상지역 내에 활성단층을 포함하는 수 개의 지진원 구역을 설정하고, 이 구역 내에서는 지진활동이 균질하다고 가정하고 계산하는 방법과(Cornell, 1968; Algermission and Perkins, 1976), 두 번째는 지진활동 특성 구분이 명확하지 않은 지역에서 적용하기 위하여 미국 지질조사소에서 개발한 지진원의 공간 평활화 기법(Frankel, 1995)이 있다. 본 연구에서는 다양한 전문가의 의견을 수렴할 수 있는 전통적인 지진재해도 계산 기법인 첫 번째 방법을 사용하였다. 이 계산 방법은 사용되는 지진원 구역 모델에 따라 등재해도 계산 결과가 조금씩 달라지기 때문에 지진원 구역화 연구가 공식화되지 않은 지역에서는 많은 수의 연구자들의 지진원 구역 모델이 필요하게 된다.

어떤 지진원으로부터 부지에서서 기준 지반 응답 ( $u_0$ )의 초과 확률이  $\lambda_i$ 라면 대상 지역 전체로부터 구해지는 초과확률은 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda(u > u_0, f_N) = 1 - \prod_i [1 - \lambda_i(u > u_0, f_N)]$$

여기서  $\lambda(u > u_0, f_N)$ 는 고유주파수  $f_N$ 의 스펙트럴 가속도 운동값  $u$ 가 기준 지반운동  $u_0$ 를 초과할 연간확률을 나타낸다. 그런데  $\lambda_i$ 의 값이 매우 작기 ( $\lambda_i \ll 1$ ) 때문에 윗 식은 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$\lambda(u > u_0, f_N) = \sum_q^N \int_{S_q} \left[ \sum_l n_q^l P(u > u_0 | D_q, M_l) \right] ds$$

여기서  $N$ 은 지진원 구역의 갯수,  $n_q^l$ 은  $q$ 번째 지진원 구역에서 규모  $M_l$  지진의 연간 발생 횟수,  $S_q$ 는  $q$ 번째 지진원 구역의 넓이,  $D_q$ 는 부지에서  $q$ 번째 지진원 구역 내의 한 지점까지의 거리를 나타낸다. 그리고  $P(u > u_0 | D_q, M_l)$ 는  $D_q$  거리만큼 떨어진 지진원 구역 내에서 규모  $M_l$ 의 지진이 발생하여 부지에서  $u_0$ 이상의 지반운동이 있을 확률을 의미하는 것으로 지진파의 스펙트럴 가속도 감쇠공식을 통하여 결정된다. 감쇠공식의 대수 표준편차 값에 따라 이 확률의 값은 0에서 1사이의 값을 갖는다.

위의 식을 계산하기 위해서는 한반도에서 지진이 유사한 지체구조적 성인에 의하여 발생되고, 따라서 앞으로 발생될 수 있는 지진을 발생 시간, 위치, 크기의 단순한 함수로 모델화한 지진원 구역 자료와 스펙트럴 지반운동 감쇠식 자료가 필요하다.

이번 연구에서는 8명의 전문가들의 제시한 지진원 구역 자료가 사용되었다. 이들 자료는 역사 지진 및 계기 지진의 진앙지 위치와 한반도의 지체구조 특징을 반영하여 제시된 것들이다.

각 전문가들은 한반도의 지진활동 특성에 대한 자신들이 연구결과를 반영하여 독립적으로 최적(Best) 또는 대안(Alternative)의 지진원 구역화를 자료 작성하고 이들에 각기 가중치를 부여함으로써 재해도 곡선의 상대적 평가를 가능하게 하였다. 지진원 구역화 자료의 각 지진 구역들은 Gutenberg-Richter b값, 연간 지진 발생 누적횟수, 최대가능 지진의 규모, 진원 깊이 등 고유한 지진 파라미터로 특징 지을수 있다.

국내의 경우 감쇠식은 Noh(1994)가 한반도 남동부에서 발생한 7개의 미소지진 ( $M_L < 4.0$ )의 기록에서 분석된 자료를 이용하여 제시한 바 있고 이기화 등은 20여 개의 미소지진 기록으로부터 감쇠식을 제시한바 있다. 또한 추계학적 방법을 이용하여 박창업도 경주지진 ( $M_L$  4.3, 1997), 울산지진 ( $M_L$  4.3, 1998) 및 여러 미소지진 분석으로부터 감쇠식을 제시하였다. 본 연구에서는 Noh의 연구 내용이 이기화 등이 제시한 식에 반영되어 있기 때문에 Noh에 의해서 제안된 감쇠식을 제외한 나머지 두개의 감쇠식을 활용하였다.

박창업 식은 제안된 형식이 지진의 모멘트 규모  $M$ 을 사용하고 있다. 이 모멘트 규모는 여러 지질학적 조건을 연구하여 발생할 지진을 정량적으로 예측하는데 가장 유용한 물리적 개념을 지니고 있는 것으로 알려져 있다 (Hanks and Kanamori, 1979). 그런데 전문가들이 제시한 지진원 구역의 각 파라미터들은 국지규모  $M_L$ 를 바탕으로 제시되어 있어 이를 감쇠식에서 사용된 규모와 통일할 필요가 있다. 하지만 국내에서는 아직까지 모멘트 규모와 국지 규모와의 관계 연구가 미진한 상태여서 본 연구에서는 미국 동부에서 Atkinson and Boore (1995)가 제안한 아래의 연구결과를 활용하였다.

$$M = -0.39 + 0.98M_L \quad (M_L \leq 5.5)$$

$$= 2.715 - 0.277M_L + 0.127M_L^2 \quad (5.5 < M_L \leq 7.0)$$

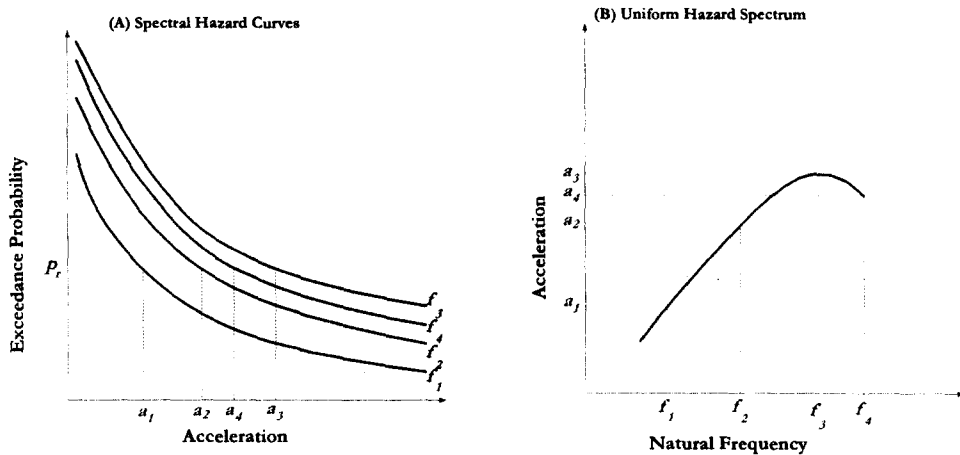


Fig. 1. Schematic forms of the spectral hazard curves(A) and uniform hazard spectrum(B) corresponding to the reference probability  $P_r$ .

### 3. 스펙트럴 재해도 및 등재해도 스펙트럼 계산

월성 원전 부지의 스펙트럴 재해도 곡선은 지반 응답의 수직 성분을 중심으로 계산되었다. 이는 수직성분의 등재해도 스펙트럼을 계산하기 위한 것으로 월성 원전에 적용된 CAN3-N289.3의 수평 응답스펙트럼은 현재 우리나라에서 보수성이 인정되는 미국 원자력 규제위원회(NRC)의 Reg. Guide 1.60 스펙트럼과 거의 같으나 수직성분 스펙트럼이 차이가 나기 때문에 이에 대한 보수성 평가를 실시하기 위해서이다. 수직 응답운동은 우선 수평 응답운동을 계산한 후 Atkins(1993)이 제안한 수평-수직 응답 운동 관계식

$$\log \frac{H}{V} = 0.0519 + 0.117 \log f_n$$

을 사용하여 크기가 조정되었다. 여기서 H와 V는 각각 수평 및 수직 성분의 스펙트럴 지반가속도( $\text{cm}/\text{sec}^2$ )를 나타낸다.

스펙트럴 재해도 곡선은 각 전문가들의 입력자료에 따라 개별적으로 계산한 후 이를 조합하여 취하였다. 이 계산 과정에서 전문가들이 한 지진원 구역에서도 a, b값, 최대 지진, 진원 깊이 등이 여러 가지로 제시하였기 때문에 이를 논리수목 식으로 계산하여 그 결과에 각 전문가들 자신이 제시한 가중치를 부여하였다. 최종적으로 이기화 등과 박창엽 식을 이용하여 계산된 월성 원전 부지의 스펙트럴 지진재해도 결과가 그림 2.에 제시되어 있다.

스펙트럴 가속도의 재해도 곡선으로부터 등재해도 스펙트럼을 계산하기 위해서는 우선 기준확률 선정이 필요한데 현재까지 이에 대한 많은 연구가 되어 있지 않은 상태이다. 따라서 일반적으로 기준확률은 원전의 안전정지지진(SSE)의 연간 초과확률을 기준으로 결정한다. 한국자원연구소에서 수행한 “양산단층을 고려한 설계 기준 지진의 재평가”(1998) 연구 내용 중 월성 원전의 지진재해도 분석 결과를 보면 월성 원전 부지의 안전정지지진( $\text{PGA}=0.2g$ )의 초과 확률은 평균값으로  $5.8 \times 10^{-4}/\text{년}$ , 중앙값으로는  $1.2 \times 10^{-4}/\text{년}$ 으로 평가되고 있다.

여기에서는 두 가지 경우의 기준 확률, 즉  $1.0 \times 10^{-4}/\text{년}$  (재래주기 10,000년)과  $1.0 \times 10^{-5}/\text{년}$  (재래주기 100,000년)에 대응하는 등재해도 스펙트럼을 계산하였다. 설정된 기준확률은 월성 원전 부지의 SSE 초과확률을 고려하여 보면 상당히 보수적인 값이다. 설정된 기준확률과 스펙트럴 가속도 재해도 곡선(그림 2)으로부터 등재해도 스펙트럼을 계산한 결과가 그림 3.과 같다. 제시되었다. 이 때 등재해도 스펙트럼은 사용된 스펙트럴 감쇠식 별로 계산하였으며 이들을 다시 통계처리 하지 않고 서로 독립적으로 해석하였다. 결과에서 보면 박창엽식에 의한 등재해도 스펙트럼 계산 결과가 이기화 등의 식을 적용한 것보다 크게 나왔으나 내진설계 기준인 CAN3-N289.3 지반스펙트럼을 초과하지는 않고 있다. 기준 확률이  $1.0 \times 10^{-5}/\text{년}$ 일 때 박창엽 식에 의한 계산결과는 사용된 지진원 구역 자료와 감쇠식의 불확실성을 생각하면 그 오차의 범위가 내진설계 기준을 초과할 우려도 있다. 이는 기준 확률 자체가 아주 낮게 설정되었기 때문이다.

이와같이 기준확률을 선정하여 원전 부지의 등재해도 스펙트럼을 계산하는 것의 물리적인 의미는 기준확률에서 구해지는 재래주기 -여기서는 10,000년 또는 100,000년- 이내의 지반운동의 응답특성을 확률론적으로 분석하여 응답의 최대치를 예측하는 것이다. 또한 이것을 내진설계 지반 응답스펙트럼과 비교하여 그 값이 더 낮게 된다면 주어진 재래주기 내에 예상되는 스펙트럴 응답의 최대값이 내진설계 지반 응답스펙트럼 보다 작기 때문에 원전의 내진 안전성이 입증된다 할 수 있다.

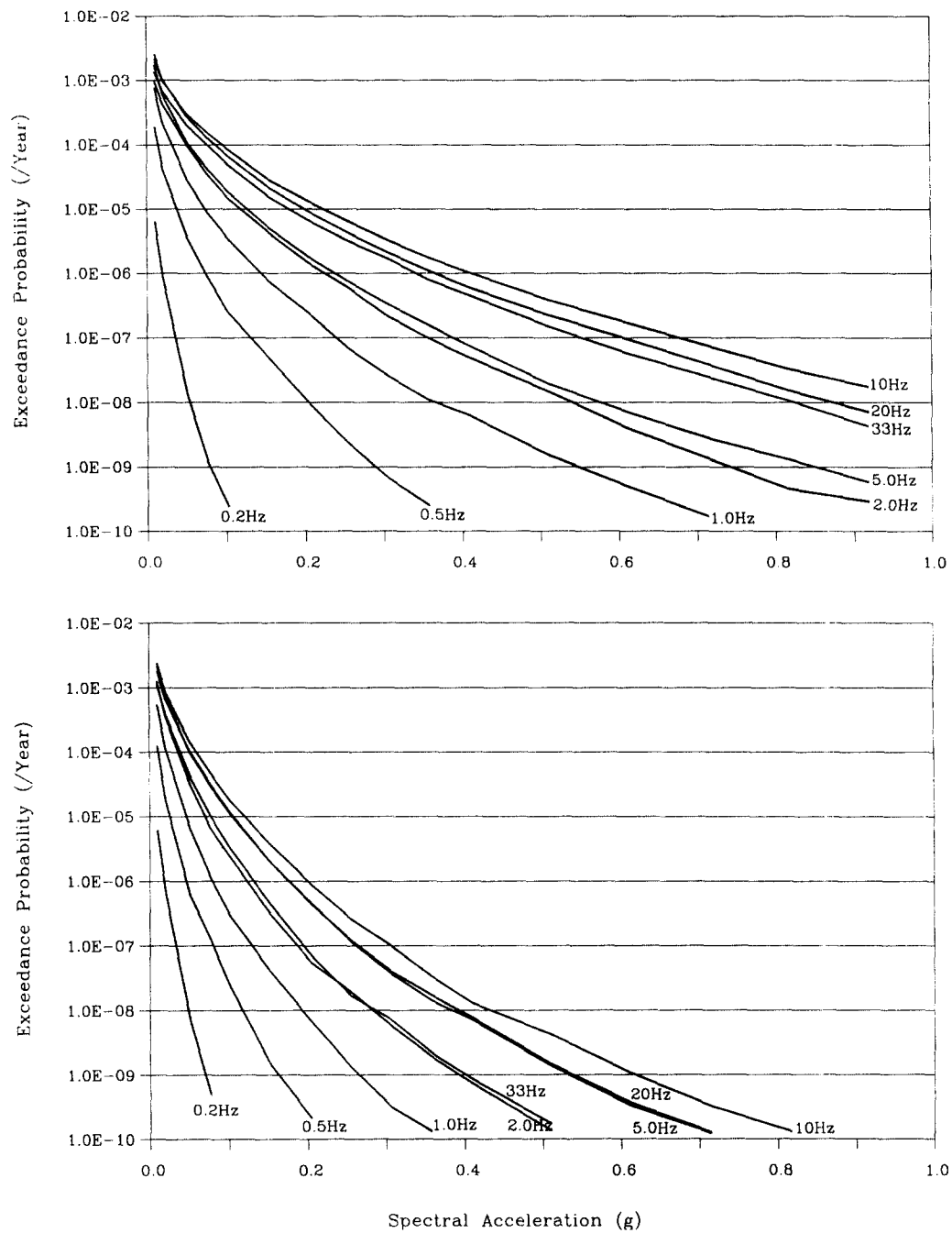


Fig 2. Median spectral hazard curves computed using two spectral attenuation relations proposed by Baag (upper figure) and Lee et. al (lower figure).

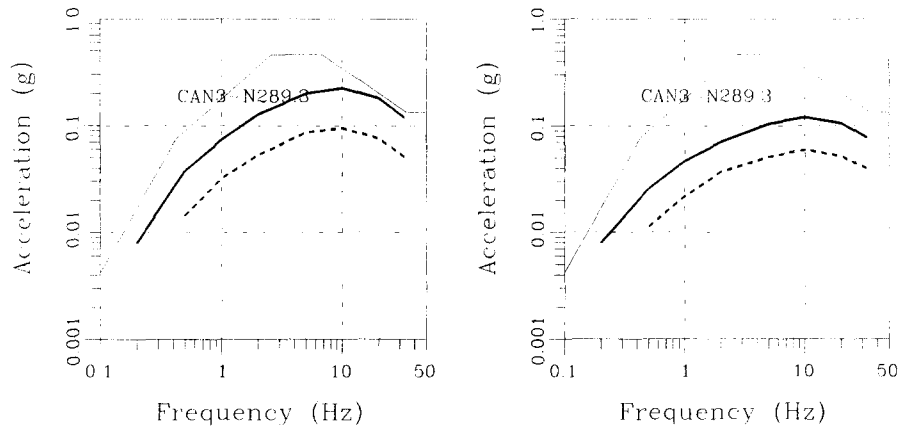


Fig 3. Comparison of the design ground response spectrum and uniform hazard spectrum (UHS) for Wolsong NPP site using the Baag's (left-hand figure) and Lee et al's (right-hand figure) spectral attenuation relations. UHS are corresponding to reference probabilities  $1.0 \times 10^{-4}$  (dashed curves) and  $1.0 \times 10^{-5}$  (solid curves). Damping factor = 5%

#### 4. 결론

현재까지 연구된 한반도의 지진활동 특성과 이로부터 만들어진 지진원 구역화 자료를 이용하고 전문가들에 의해서 제시된 모든 스펙트럴 가속도 감쇠식을 사용하여 월성 원전 부지의 등재해도 스펙트럼을 계산한 결과는 월성 원전 2,3,4호기 내진설계 기준인 CAN3-N289.3을 초과하지 않는 것을 보여주고 있다. 이는 월성 원전의 수직 지반 응답스펙트럼의 내진설계 기준이 보수성을 지닌다는 것을 입증하는 것으로 1992년 이미 모델 검증시험으로 입증된 바 있는 수평응답스펙트럼의 보수성과 함께 CAN3-N289.3 응답스펙트럼은 전체적으로 한반도의 지진활동 특성을 반영하여 볼 때 보수성을 지닌다 할 수 있다.

등재해도 스펙트럼 계산은 PSHA의 경우와 같이 예상되는 지반 응답 특성을 확률적으로 예측하는 것이다. 이는 부지고유 응답스펙트럼이 개발되지 않은 조건에서는 부지 특성을 밝히는데 유용한 방법으로 이러한 등재해도 스펙트럼 연구 결과는 향후 부지고유 응답스펙트럼 개발에 좋은 사전 정보로 활용될 수 있고 나가서 원전 건설에 사용되는 설계 응답스펙트럼 개발에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 박창엽(1998), 경상분지 내의 강지반운동의 추계학적 예측, 미발표
2. 이기화, 노명현, 박지역(1998), 한반도 남부 지역의 지진동 감쇠식 개발, 한국지진공학회 춘계 학술논문 발표집, pp39-43
3. Algermisson, S. T. and Perkins, D. M., (1976), A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States, U.S.G.S. Open File Report pp 786-416.

4. Atkinson, G (1993). "Notes on Ground Motion parameters for eastern North America : Duration and H/V ratio, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.83, pp.587-596.
5. Atkinson, G.and D. Boore (1995). "Ground motion relations for eastern North America," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.85, pp.17-30.
6. Boore, D. and G. 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, pp.440-467.
7. Cornell, C. A., (1968), Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.58, pp.1583-1606.
8. Frankel, A., (1995), Mapping seismic hazard in central and eastern United States, *Seismic Research Letters*, Vol. 66, pp 8-21
9. Hanks, T and H. Kanamori (1979). "A moment magnitude scale," *J. Geophys. Res.*, Vol.84, pp.2348-2350.
10. Noh, M (1994), Spectral Analyses of Earthquakes in the Southern Part of the Korean Peninsula, *Ph. D. Thesis, SNU*