

고진동수 영역이 보강된 APR1400 설계지반응답스펙트럼의 개발

Development of the DGRS enriched in the high frequency range for APR1400

장영선* 김태영* 주광호** 김종학***
Jang, Young-Sun Kim, Tae-Young Joo, Kwang-Ho Kim, Chong-Hak

ABSTRACT

This paper presents the Safe Shutdown Earthquake(SSE) input motion for the seismic design of the Advanced Power Reactor 1400(APR1400). The Design Ground Response Spectra(DGRS) for the SSE is based on the design spectrum specified in Regulatory Guide(RG) 1.60 of U.S. Nuclear Regulatory Commission(US NRC), anchored to a Peak Ground Acceleration(PGA) of 0.3g and enriched in the high frequency range. This SSE seismic input motion is to be applied to the seismic analysis as the free-field seismic motion at the ground surface of both the rock and generic soil sites for APR1400. The enrichment for APR1400 seismic input motion is performed considering the current US NRC regulations, the seismic hazard studies performed by the Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL) and Electric Power Research Institute(EPRI) for the Central and Eastern United States nuclear power plant sites, and the seismic input motions used in the design certifications of the three existing U.S. advanced standard plants. It is represented by a set of DGRS and the accompanying Target Power Spectral Density(PSD) Function in both the horizontal and vertical directions.

1. 서론

현재까지 우리나라에서 건설된 원자력발전소의 구조물은 견고한 암반 위에 건설되었기 때문에 고정지반으로 가정하여 지반-구조물 상호작용을 해석에 고려하지 않았으며, 입력지진으로 미 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission : NRC)의 Regulatory Guide(RG) 1.60 설계응답스펙트럼을 적용하여 왔다.

APR1400은 토질지반에도 건설될 수 있도록 포괄적인 부지조건을 고려하여 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하였으며, 입력지진으로 현재의 인허가요건에서 최소한으로 만족하여야 하는 RG 1.60

* 한국전력기술(주), 정회원

** 한전 전력연구원, 정회원

*** 한전 전력연구원

을 포괄하는 설계지반응답스펙트럼(Design Ground Response Spectrum : DGRS)를 기준으로 국내의 관련 연구 결과를 참조하여 고진동수 영역을 다소 보강함으로써 지진입력에 대한 합리성과 경제성을 제고하고자 하였다.

지반의 설계응답스펙트럼은 원전 구조물의 내진설계를 위한 가장 기본적이고 중요한 요소의 하나이며, 이를 효과적으로 평가하기 위해선 일반적으로 실제 관측된 강지진동 자료를 통계적으로 처리하여 개발하여야 한다. 그러나 공학적으로 활용 가능한 계기지진자료가 부족한 우리나라에서는 계측자료를 이용하여 부지고유의 입력지진운동을 결정하는 것은 많은 어려움이 뒤따르므로, 현재로서는 외국의 강진기록 중 지질 및 지진특성이 유사한 지역의 자료를 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

이러한 취지에서 APR1400의 입력지진은 현재의 규제요건과 지질 및 지진특성이 우리나라와 유사한 미 중동부의 원자력발전소를 위하여 로렌스 리버모어 국립연구소(Lawrence Livermore National Laboratory : LLNL)와 전력연구소(Electric Power Research Institute : EPRI)에서 수행한 지진재해도 분석결과를 참조하여 개발하였으며, 개발된 수평과 수직의 설계지반응답스펙트럼에 상응하는 Target Power Spectral Density(PSD) 함수도 함께 제시하였다.

2. 설계지반응답스펙트럼

2.1 한반도 및 미 중동부의 지질 비교

전반적인 지질학적 관점에서 지체구조의 특성은 크게 안정대륙지역(Stable Continental Region ; SCR)과 구조운동이 활발한 지역으로 분류할 수 있으며, 우리나라와 미 중동부는 SCR로 분류되기 위한 다음의 기준들을 대체로 충족시키고 있다.

- 초기 백악기(약 1억년전) 이후의 조산운동이 없음. 여기서 조산운동이란 압축 또는 인장운동과 연관되는 주요한 용암활동, 변형, 또는 기반암의 광역 변성작용을 포함함.
- 1억년전 이후로 조산대 내의 변형된 해안지가 없음.
- 초기 백악기 이후의 주요 비조산 관입이 없음.
- 고제3기(24만년전) 이후로 용기나 주요 확장 또는 압축이 없음.

우리나라와 미 중동부의 두 SCR이 유사한지 여부는 영향면적 내 기반암의 연령뿐만 아니라 가장 최근의 주요 지각활동에 따라 판단할 수 있으며, EPRI[참고문헌 4]의 SCR에 대한 검토에 따르면, 우리나라도 SCR에 속하므로 한반도의 지진학적 특성이 미 중동부와 유사하다고 간주할 수 있다.

2.2 현행 미 NRC의 규제요건

미국의 10 CFR Part 100의 Subpart B(법률)는 1997년 1월 10일 이후에 인허가를 신청하는 원전에 적용할 입력지진의 요건을 기술하고 있다. 특히, 10 CFR Part 100의 100.23 중 Item (d)(1)은 자유장 지표면에서의 수평과 수직방향 지반응답스펙트럼으로 표현되는 SSE 지반운동을 요구하고 있다. SSE의 평가에는 어느 정도의 불확실성이 포함되어 있으며, 이들 불확실성은 확률론적 재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis : PSHA)이나 민감도 분석 등의 적절한 해석을 통하여 다루어져야 한다. 미 RG 1.165는 10 CFR Part 100의 100.23의 요건을 만족시키기 위한 PSHA 수행과 SSE 결정의 절차에 대한 일반적인 사항을 기술하고 있다.

역사적인 강진자료가 부족한 관계로 APR1400의 SSE를 평가하기 위한 충분한 정도의 PSHA를 수행하기에는 어려움이 있다. 그러나 APR1400의 잠재적인 부지의 지진학적 특징이 미 중동부와 유사하다고 가정함

으로써 미 중동부의 원전 부지에 대한 PSHA 결과를 적용하여 0.3g의 PGA를 갖는 SSE에 대한 DGRS의 고진동수 영역에서 스펙트럼 증폭계수를 평가할 수 있다. 미 중동부 원전 부지에 대한 PSHA는 LLNL과 EPRI에 의하여 1980년대 초반에 이루어졌다. LLNL과 EPRI가 PSHA를 수행하면서 사용한 절차는 RG 1.165에 반영이 되었고, 미 NRC로부터 승인을 얻었다.

2.3 미 중동부 원전에 대한 고진동수 영역에서의 스펙트럼 증폭계수

2.2의 PSHA 수행결과, LLNL과 EPRI는 미 중동부 원전의 개별 부지에 대한 지표면에서의 Uniform Hazard Response Spectra와 PGA를 산출하였다.

본 연구에서는 1992년의 재 수행된 LLNL의 재해도 분석결과가 좀 더 보수적이기 때문에, 이 결과를 미 중동부 원전에 대하여 고진동수 영역에서의 가속도 응답스펙트럼 증폭계수를 결정하기 위한 기초자료로 활용하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 EPRI와 LLNL의 재해도 분석은 토양부지에서 토양을 지나 증폭된 지반 운동의 지표면에서의 응답스펙트럼과 PGA를 평가하기 위한 것이었다. 표 1과 2에 미 중동부 69개 원전부지의 재해도 분석결과가 PGA(Median)와 25Hz에서의 가속도 응답스펙트럼 값 Sa, 스펙트럼 증폭계수 R(25Hz), 그리고 스펙트럼 증폭계수를 사용하여 평균에 표준편차를 더한 값($R_M + R_{SD}$)_{25Hz}으로 정리되어 있다. 하나의 예로서 그림 1에 Seabrook 부지에 대한 1만년 빈도, 즉 초과확률 1×10^{-4} 의 수평방향 가속도 응답 스펙트럼(Median, 5% 감쇠)이 나타나 있다. 가속도 응답 스펙트럼 값(Median, 5% 감쇠) Sa는 다음과 같이 속도 응답 스펙트럼 값(Median) Sv로부터 환산된다.

$$\text{Median Sa (cm/sec}^2\text{)} = \text{Median Sv (cm/sec)} \times 2\pi f \text{ (Hz)}$$

예로서 25Hz에서는 다음과 같다.

$$\text{Median Sa(25 Hz)} = 1.92 \text{ cm/sec} \times 2\pi \times 25 = 302 \text{ cm/sec}^2$$

또한 그림 1은 Seabrook의 초과확률 1×10^{-4} 에 상응하는 수평방향 PGA(Median) 값도 보여주고 있다. 이 PGA 값은 초과확률 1×10^{-4} 부근의 다른 두 값과의 내삽(Linear Interpolation)을 통하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{Median PGA}_1 (p_1 = 1.82 \times 10^{-4}) = 150 \text{ cm/sec}^2$$

$$\text{Median PGA}_2 (p_2 = 5.82 \times 10^{-5}) = 250 \text{ cm/sec}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Median PGA} (p = 1.00 \times 10^{-4}) &= \text{Median PGA}_2 - (\text{Median PGA}_2 - \text{Median PGA}_1) \times (p - p_2) / (p_1 - p_2) \\ &= 216 \text{ cm/sec}^2 \end{aligned}$$

미 중동부의 다른 원전 부지에서도 10Hz와 25Hz에서 수평방향 가속도 응답 스펙트럼(Median)과 증폭계수가 대체적으로 서로 유사한 경향을 보인다. 따라서 미 중동부 원전의 Uniform Hazard Response Spectra를 사용하여 RG 1.60 스펙트럼의 고진동수 영역 증폭계수를 결정하는 것은 10Hz와 25Hz에서 비교하는 것만으로 충분할 것이다.

2.3.1 25Hz에서의 증폭계수

표 1에 1992년 LLNL의 재해도 분석결과가 69개의 미 중동부 원전 부지 중 59개의 부지에 대하여 PGA(Median)와 25Hz에서의 가속도 응답스펙트럼 값 Sa, 그리고 스펙트럼 증폭계수 R(25Hz)로 정리되어 있다. 나머지 10개 부지에서는 초과확률이 1×10^{-4} 보다 적은 경우의 자료가 없기 때문에 사용하기에 부적합하였다. 표 2는 59개 부지의 스펙트럼 증폭계수를 사용하여 평균에 1배의 표준편차를 더한 값($R_M + R_{SD}$)_{25Hz}을 보여주고 있다. 이렇게 계산된 25Hz에서의 평균에 표준편차를 더한 스펙트럼 증폭계수를 RG 1.60의 스펙트럼 증폭계수와 비교하였다. RG 1.60의 스펙트럼 증폭계수도 계속된 지진자료를 사용하여 LLNL의 분석과 똑같은 방법으로 계산되었다. 본 연구에서의 비교 결과는 다음과 같다.

$$(R_M + R_{SD})_{25Hz} = 1.47 + 0.13 = 1.60$$

2.3.2 10Hz에서의 증폭계수

10Hz에서의 59개 부지에 대한 초과확률 1×10^{-4} 에 대한 스펙트럼 증폭계수(Median)와 스펙트럼 증폭계수의 평균 더하기 표준편차를 한 값은 25Hz에서의 똑같은 방법으로 계산되어져 표 2에 정리되어 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$(R_M + R_{SD})_{10Hz} = 1.43 + 0.15 = 1.58$$

그림 2에 미 중동부 부지에 대한 10Hz와 25Hz에서의 스펙트럼 증폭계수를 RG 1.60의 수평가속도 스펙트럼 증폭계수(5% 감쇠)와 비교한 결과가 나타나 있다. RG 1.60과 미 중동부의 스펙트럼 증폭계수를 비교해 보면 약 15Hz 이하에서는 RG 1.60의 결과가 크며, 25Hz에서는 RG 1.60의 스펙트럼 증폭계수가 1.23, 미 중동부의 스펙트럼 증폭계수가 1.60으로 두 스펙트럼의 증폭계수 비는 $1.30(=1.60/1.23)$ 이 된다.

2.4 제안된 DGRS

APR1400 수평방향 SSE의 DGRS는 RG 1.60을 바탕으로 하여 좀 더 보수적으로 고진동수 영역이 보강되었으며, 0.3g PGA에 맞추어진 응답스펙트럼으로 제안되었다. 고진동수 영역의 보강은 모든 감쇠비에 대하여 다음과 같은 절차로 이루어졌다.

- (a) RG 1.60의 응답스펙트럼을 25Hz에서 30% 증가시킨다.
- (b) Log-Log 좌표계에서 RG 1.60의 응답스펙트럼을 9Hz에서 25Hz까지 직선으로 긋는다.
- (c) Log-Log 좌표계에서 RG 1.60의 응답스펙트럼을 25Hz에서 40Hz까지 직선으로 긋는다. 9Hz에서 25Hz 사이의 성분을 보강한 취지에 맞추어 PGA 값을 40Hz에 맞추었다.

표 3은 2%, 3%, 5%, 7%, 그리고 10% 감쇠비에 대하여 0.25, 2.5, 9.0, 25, 그리고 40Hz에서의 수평방향 DGRS의 가속도 증폭계수를 보여주고 있으며, 그림 2에서는 5% 감쇠비에 대하여 RG 1.60과 APR1400의 DGRS를 비교하여 보여주고 있다.

수직방향 DGRS는 통제진동수(Controlling Frequency)가 2.5Hz에서 3.5Hz로 바뀌었고 3.5Hz 이하의 영역에서 가속도 증폭계수가 수평방향보다 작은 것을 제외하고는 수평방향 DGRS와 똑같다. 3.5Hz 이하의 영역에서는 수직방향 DGRS가 RG 1.60의 수직방향 응답스펙트럼과 동일하다. 표 4는 2%, 3%, 5%, 7%, 그리고 10% 감쇠비에 대하여 0.25, 3.5, 9.0, 25, 그리고 40Hz에서의 수직방향 DGRS의 가속도 증폭계수를 보여주고 있다.

3. Power Spectral Density Function

수평방향 DGRS에 대한 PSD 함수는 RG 1.60에 있는 수평방향 설계 응답스펙트럼에 대한 PSD 함수를 수정한 것이다. 수직방향 DGRS에 대한 PSD 함수는 수평방향 PSD 함수에서 3.5Hz보다 작은 진동수 구간을 수정하여 결정하였다.

3.1 수평방향 DGRS에 대한 PSD 함수

미 NRC의 Standard Review Plan(SRP) 3.7.1 부록 A에 최대지반가속도가 1.0g인 RG 1.60의 수평방향 설계 응답스펙트럼에 대한 PSD 함수의 공식이 제공되어 있다. 최대지반가속도 0.3g에 해당하는 PSD 함수는 주어진 공식에 $(0.3)^2 = 0.09$ 배를 함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{PSD} &= 58.5 \times (f/2.5)^{0.2} \text{in}^2/\text{sec}^3 && f = 0.25 \sim 2.5\text{Hz} && (1) \\ &58.5 \times (2.5/f)^{1.8} \text{in}^2/\text{sec}^3 && f = 2.5 \sim 9.0\text{Hz} && (2) \\ &5.832 \times (9.0/f)^3 \text{in}^2/\text{sec}^3 && f = 9.0 \sim 16.0\text{Hz} && (3) \\ &1.035 \times (16.0/f)^8 \text{in}^2/\text{sec}^3 && f = 16.0 \sim 24.0\text{Hz} && (4) \end{aligned}$$

수평방향 DGRS에 대한 PSD 함수는 다음과 같은 보수적인 방법으로 정의되었다.

- (a) $f = 0.25 \sim 2.5\text{Hz}$ 구간에서는 (1)과 동일함.
- (b) $f = 2.5 \sim 9.0\text{Hz}$ 구간에서는 (2)와 동일함.
- (c) $f = 9.0 \sim 16.0\text{Hz}$ 구간에서는 (2)를 16Hz까지 연장시킴.
- (d) $f = 16.0 \sim 25.0\text{Hz}$ 구간에서는 (3)과 평행하도록 함.
- (e) $f \geq 25.0\text{Hz}$ 구간에서는 (4)와 평행하도록 함.

그 결과로써 수평방향 DGRS에 대한 PSD함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{PSD} &= 58.5 \times (f/2.5)^{0.2} \text{in}^2/\text{sec}^3 && f = 0.25 \sim 2.5\text{Hz} && (5) \\ &58.5 \times (2.5/f)^{1.8} \text{in}^2/\text{sec}^3 && f = 2.5 \sim 16.0\text{Hz} && (6) \\ &2.070 \times (16.0/f)^3 \text{in}^2/\text{sec}^3 && f = 16.0 \sim 25.0\text{Hz} && (7) \\ &0.543 \times (25.0/f)^8 \text{in}^2/\text{sec}^3 && f \geq 25.0\text{Hz} && (8) \end{aligned}$$

그림 3에서 볼 수 있듯이 Log-Log 좌표계에서 표현하면 연속한 통제진동수 사이의 두 가지 수평방향 PSD 함수는 선형으로 변화됨을 알 수 있다.

PSD의 정의에 의하면, 주어진 진동수에서 시간이력에 대한 PSD 함수는 대략 비감쇠 속도 응답 스펙트럼의 제곱과 비례한다. 따라서, 특정한 진동수에서 서로 상이한 시간이력에 대한 PSD 함수의 비는 비감쇠 속도 응답스펙트럼 또는 이에 근사적인 비감쇠 가속도 응답스펙트럼의 제곱의 비와 대략 일치한다. 여기에서 보다 대략적인 가정을 하면, PSD함수의 비는 2% 감쇠 가속도 응답스펙트럼에 대한 제곱의 비로 PSD 함수의 비를 유추할 수 있다. 즉,

$$\text{PSD}_2/\text{PSD}_1 \cong [S_a(2\%)_2/S_a(2\%)_1]^2$$

APR1400에 사용될 수평방향 PSD 함수에서 9Hz보다 큰 진동수 구간에 대한 적정성은 다음과 같이 16Hz와 25Hz에서 PSD 함수의 비와 $S_a(2\%)$ 의 비로 확인할 수 있다.

Frequency	$\text{PSD}_{\text{APR1400}}/\text{PSD}_{\text{RG1.60}}$	$[S_a(2\%)_{\text{APR1400}}/S_a(2\%)_{\text{RG1.60}}]^2$
16 Hz	2.0	$(0.703\text{g}/0.607\text{g})^2 = 1.34$
25 Hz	18.7	$(0.511\text{g}/0.393\text{g})^2 = 1.69$

PSD 함수의 비가 해당 응답스펙트럼에 대한 제곱의 비를 크게 상회하고 있으므로, APR1400에 사용될 9Hz 이상의 수평방향 PSD 함수는 RG 1.60에 비해 충분히 크다고 할 수 있다.

AP600과 APR1400의 수평방향 DGRS가 서로 유사하기 때문에 그림 3에는 AP600의 PSD 함수도 도시하였다. PSD 함수의 비와 응답스펙트럼의 비의 대략적인 관계로 보았을 때, 9Hz 이상에서 RG 1.60에 대한 PSD 함수와 비교해 보면 AP600보다는 APR1400의 PSD 함수가 더욱 합리적이라는 것을 알 수 있다.

3.2 수직방향 DGRS에 대한 PSD 함수

수직방향 DGRS에 대한 PSD 함수는 3.5Hz 미만의 진동수 구간을 제외하고 수평방향 DGRS에 대한 PSD 함수와 동일하다. 수직방향 DGRS는 3.5Hz 미만의 진동수 구간에서 0.25Hz부터 2.5Hz까지의 수평방향 DGRS에 대해 2/3의 값을 사용한다. 따라서 수직방향 DGRS에 대한 PSD 함수의 첫 번째 구간은 0.25Hz에서 3.5Hz까지이며, 수평방향 DGRS에 대한 PSD 함수의 첫 번째 구간과 평행

하게 잡을 수 있다. 이것은 Log-Log 좌표상에서 식 (5)를 그렸을 때 3.5Hz에서 식 (6)에 해당하는 두 번째 구간과 교점이 된다. 이렇게 하면 수직방향 PSD 함수의 첫 번째 구간은 수평방향 PSD 함수의 0.5Hz에서 2.5Hz 구간에 대해 $(2/3)^2$ 또는 4/9 배를 약간 상회한다. 3.5Hz 이상의 진동수 구간에 대한 수직방향 PSD 함수는 수평방향 PSD 함수와 동일하게 잡는다. 이로써 APR1400에 사용될 수직방향 DGRS에 대한 PSD 함수는 다음과 같은 공식으로 정의될 수 있다.

$$PSD = 0.51 \times [58.5 \times (f/2.5)^{0.2} \text{in}^2/\text{sec}^3] \dots \dots \quad f = 0.25 \text{ to } 3.5\text{Hz} \quad (5)$$

$$58.5 \times (2.5/f)^{1.8} \text{in}^2/\text{sec}^3 \dots \dots \dots \quad f = 3.5 \text{ to } 16.0\text{Hz} \quad (6)$$

$$2.070 \times (16.0/f)^3 \text{in}^2/\text{sec}^3 \dots \dots \dots \quad f = 16.0 \text{ to } 25.0\text{Hz} \quad (7)$$

$$0.543 \times (25.0/f)^8 \text{in}^2/\text{sec}^3 \dots \dots \dots \quad f \geq 25.0\text{Hz} \quad (8)$$

그림 3에서처럼 이를 Log-Log 좌표계에서 표현하면 연속한 통제진동수 사이의 수직방향 PSD 함수는 선형으로 변화한다.

4. 인공가속도시간이력 생성

개발된 설계지반응답스펙트럼에 대응하는 3 방향(동서, 남북, 수직) 성분의 인공가속도시간이력을 Random Vibration 이론에 의해 생성하였다(그림 4). 이 인공가속도시간이력은 작성된 가속도시간이력의 응답스펙트럼이 DGRS를 포괄하며, 3.에서 정의된 목표 PSD 함수의 80%를 상회하고, 최대지반가속도 1.0 g에 대한 최대 변위가 36 inch 이내가 되도록 하였다. 또한 총 지속시간이 10 초에서 25 초 이내에 들도록 20.48 초의 지속기간을 갖으며, 강진구간은 약 8 초 내외이고, 각 방향성분 상호독립을 위하여 최대 Cross-correlation Coefficient가 0.3보다 작도록 작성되었다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 우리나라와 미 중동부의 전반적인 지질학적 특성을 살펴보았으며, 안정대륙지역으로 분류되기 위한 기준들을 대체로 충족시키고 있음을 알았다.
- LLNL과 EPRI에 의하여 수행된 미 중동부 원전의 확률론적 재해도 분석 결과를 검토하고, 이를 활용하여 설계지반응답스펙트럼의 고진동수 영역에서의 가속도 응답스펙트럼 증폭계수를 결정하기 위한 기초자료로 활용하였다.
- APR1400 수평방향 SSE(0.3g)의 DGRS로서 RG 1.60을 바탕으로 하여 25Hz에서 RG 1.60보다 30% 보강된 설계지반응답스펙트럼과 이에 상응하는 PSD 함수도 함께 제안하였다. 제안된 설계지반응답스펙트럼(CMS1+)는 자유장 지표면에서 정의되었다.
- 우리나라에 적용할 수 있는 합리적인 설계지반응답스펙트럼을 도출하기 위해서는 확률론적 지진 재해도 분석의 이론과 절차, 관련 규정들이 확립된 만큼 많은 지질학적, 지진학적 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

표 1. Median PGA and Spectral Amplifications for Individual CEUS Sites
(Seabrook Site)⁽¹⁾

Exceed. Prob. ⁽²⁾	Med. PGA (cm/sec ²) ⁽³⁾	Med. Sv _{25Hz} (cm/sec) ⁽⁴⁾	Med. Sa _{25Hz} (cm/sec ²) ⁽⁴⁾	Sa _{25Hz} /PGA	Med. Sv _{10Hz} (cm/sec) ⁽⁴⁾	Med. Sa _{10Hz} (cm/sec ²) ⁽⁴⁾	Sa _{10Hz} /PGA
1.82E-04	150						
1.00E-04	216	1.920	302	1.39	4.310	271	1.25
5.82E-05	250						

- (1) LLNL과 EPRI에 의하여 PSHA가 수행된 부지는 59개이지만, 여기서는 지면관계 상 하나의 예만 보임. 상세한 것은 참고문헌을 참조바람.
 (2) PGA for p other than 1.0E-4 is from NUREG-1488, Appendix A. PGA for p = 1.0E-4 is computed above by linear interpolation.
 (3) From NUREG-1488, Appendix B, for return period of 10,000 years or p = 1.0E-4.
 (4) SA_{25Hz} = Sv_{25Hz}*25*6.2832 and SA_{10Hz} = Sv_{10Hz}*10*6.2832. Spectra are associated with 5% damping.

표 2. Mean and Standard Deviation Spectral Amplification for CEUS Sites⁽¹⁾

Mean(M) and Stand. Dev.(SD) for R_{25Hz}=Sa_{25Hz}/PGA and R_{10Hz}=Sa_{10Hz}/PGA

Site	R _{25Hz}	(R _{25Hz} -RM) ²	R _{10Hz}	(R _{10Hz} -RM) ²
Arkansas	1.31	0.0253	1.51	0.0066
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Seabrook	1.39	0.0060	1.25	0.0327
	(RM) _{25Hz}	(RSD) _{25Hz}	(RM) _{10Hz}	(RSD) _{10Hz}
	1.47	0.13	1.43	0.15
	(RM) _{25Hz} +(RSD) _{25Hz}		(RM) _{10Hz} +(RSD) _{10Hz}	
	1.60		1.58	

- (1) LLNL과 EPRI에 의하여 PSHA가 수행된 부지는 59개이지만, 여기서는 지면관계 상 2개의 예만 보임. 상세한 것은 참고문헌을 참조바람.

표 3. Spectral Amplifications for Horizontal DGRS for APR1400

Damping	Displacement Amplification	Acceleration Amplification				
		0.25Hz	0.25Hz	2.5Hz	9.0Hz	25Hz
2%	2.50	0.57	4.25	3.54	1.70	1.00
3%	2.35	0.54	3.76	3.13	1.66	1.00
5%	2.05	0.47	3.13	2.61	1.60	1.00
7%	1.88	0.43	2.72	2.27	1.55	1.00
10%	1.70	0.39	2.28	1.90	1.49	1.00

* Horizontal peak ground displacement = 36 inches for horizontal PGA = 1.0g.

표 4. Spectral Amplifications for Vertical DGRS for APR1400

Damping	Displacement Amplification	Acceleration Amplification				
		0.25Hz	0.25Hz	3.5Hz	9.0Hz	25Hz
2%	1.67	0.38	4.05	3.54	1.70	1.00
3%	1.57	0.36	3.58	3.13	1.66	1.00
5%	1.37	0.31	2.98	2.61	1.60	1.00
7%	1.25	0.29	2.59	2.27	1.55	1.00
10%	1.13	0.26	2.17	1.90	1.49	1.00

* Vertical peak ground displacement = 36 inches for vertical PGA = 1.0g.

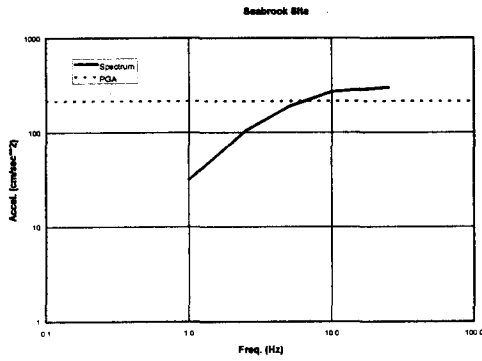


그림 1. LLNL Estimate of Median 5% Damping Acceleration Spectrum and Median PGA for $p = 1.0E-4$ at Seabrook Site

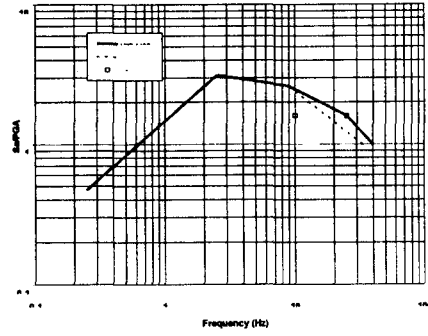


그림 2. Comparison of Horizontal Acceleration Spectrum Amplifications for 5% Damping between RG 1.60, CEUS Sites and DGRS for APR1400

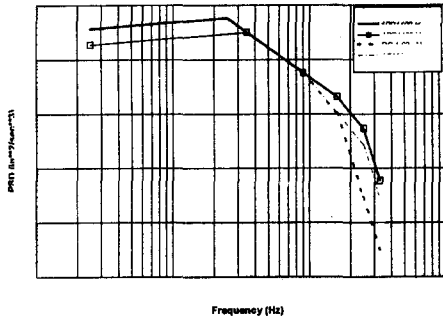


그림 3. Horizontal PSD Functions for APR1400, RG 1.60 and AP600 and Vertical PSD Function for APR1400

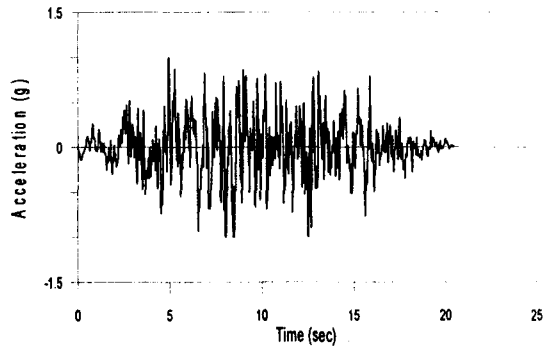


그림 4. Artificial Acceleration Time History (EW Direction)

참고문헌

1. P. Sobel(1994), Revised Livermore Seismic Hazard Estimates for Sixty-Nine Nuclear Power Plant Sites East of Rocky Mountains, NUREG-1488.
2. Seismic Hazard Characterization of 69 Nuclear Plant Sites East of the Rocky Mountain, NUREG/CR-5250, 1989.
3. Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States, EPRI Report NP-4726, 1988.
4. Probabilistic Seismic Hazard Evaluation at Nuclear Plant Sites in the Central and Eastern United States: Resolution of the Charleston Issue, EPRI Report NP-6395-D, 1989.
5. The Earthquakes of Stable Continental Regions: Assessment of Large Earthquake Potential, EPRI Report TR-102261-V1, Final Report, 1994.