

입력스펙트럼 형상이 층응답스펙트럼에 미치는 영향 평가 Effects of Input Response Spectrum Shape on the Floor Response Spectrum

최인길, 전영선, 서정문

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

요 약

입력스펙트럼의 진동수 특성이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 여러 가지 입력지진에 의한 층응답스펙트럼 작성을 통하여 평가하였다. 고진동수 성분이 우세한 입력지진이 층응답스펙트럼에 미치는 영향은 구조물의 기본 진동수에 따라 크게 차이가 나는 것으로 나타났다. 특히 구조물의 고유진동수가 클 경우 고진동수 입력에 의한 층응답스펙트럼의 증폭이 매우 크게 나타났다. 우리나라의 지진 특성이 고진동수 성분이 매우 우세한 것으로 밝혀지고 있어 추후 구조물 및 기기의 내진성능 평가 시에는 이러한 고진동수 지진동 특성이 전기기기와 같이 고진동수 성분에 민감한 기기의 구조적, 기능적 파괴에 미치는 영향을 반드시 고려하여 평가하여야 한다.

ABSTRACT

The effects of input response spectrum shape on the floor response spectrum were investigated by performing the direct generation of floor response spectrum from the ground response spectrum. In this study several kinds of input ground response spectrum were used for the generation of floor response spectrum. From the result of this study, it was observed that the potential damage on the nuclear power plant equipments located in a building from high frequency seismic ground motions depends on the natural frequency of structures. The floor spectral acceleration in the high frequency region was greatly amplified in the stiff structures. The result of recent seismic hazard analysis indicates that the ground motion response spectra have relatively large high frequency acceleration contents. So the effects of high frequency spectral acceleration contents on the floor response spectrum should be considered in the seismic fragility analysis and seismic margin assessment of the nuclear power plant structures and equipments sensitive to the high frequency ground motion.

1. 서론

원자력 발전소의 설계 및 해석 뿐 아니라 SPRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment)나 SMA(Seismic Margin Analysis)에서는 입력지진 또는 평가에 필요한 기준지진으로 응답스펙트럼이 사용된다. 우리나라 원전 구조물 및 기기의 내진설계에서는 부지 고유의 설계응답 스펙트럼을 가지고 있지 못함에 따라 US NRC R.G. 1.60[1]에서 제시하고 있는 표준응답스펙트럼을 사용하여 왔다. 그러나 이 표준응답스펙트럼은 강지진대에 속하는 미국 서부에서 발생한 강진기록을 이용하여 작성한 것으로 우리나라나 미국 동부지역에 적용하기에는 부적절한 것으로 나타났다[2]. 미국 동부지역이나 우리나라의 지진재해도 분석 결과 R.G. 1.60 스펙트럼에 비해 저진동수 영역에서는 매우 낮은 값을 보이고 있으며 고진동수 영역에서는 큰 값을 보여주고 있다[2,3,4]. 이는 미국 서부의 충적층 지반에서 측정된 한정된 지진자료를 이용하여 작성된 것이기 때문이며 미국 서부 지역의 암반지반에 대해서 조차도 10Hz 이상의 진동수대에서 저평가되어 있는 것으로 나타났다[3].

기존의 설계스펙트럼에 비해 최근의 연구결과에 따른 부지 고유 스펙트럼이나 UHS(Uniform Hazard Spectrum)이 10Hz 이상의 고진동수 영역에서 매우 큰 값을 보여주고 있어 이에 대한 평가가 필수적이라 하겠다. 이를 위해 미국 EPRI에서는 고진동수 지진과의 영향에 대한 평가를 수행한 바 있으며, 이 연구를 통하여 고진동수 지진동의 영향을 반영한 기준스펙트럼의 작성법을 제시한 바 있다. 기존 기기의 내진성능 평가 시 용접부의 파괴를 취성파괴로 보고 연성도를 고려하지 않았으나 이 연구에서는 용접부의 최소연성도를 고려함으로써 고진동수 성분 지진동이 감소될 수 있음을 보여주었다. 그러나 건물 내부에 설치된 고진동수 지진동에 민감한 전기기기의 기능적 파괴모드에 대한 평가는 제외하였으며[2], 기기의 구조적 또는 기능적 파괴모드에 대한 내진성능 평가를 위해서는 이러한 기준 스펙트럼을 이용하여 층응답스펙트럼을 다시 작성하여야 한다.

본 연구에서는 입력 스펙트럼으로부터 랜덤진동이론을 이용하여 직접 층응답스펙트럼을 평가할 수 있는 방법을 이용하여 고진동수 특성을 갖는 지진동이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하였다. 먼저 기존의 지진취약도 평가에 사용된 부지고유 응답스펙트럼이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하였으며, 우리나라 지진재해도 분석 결과에 따른 등재해도 스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼 작성을 통하여 고진동수 지진동에 의한 층응답스펙트럼의 영향을 평가하였다.

2. 내진성능 평가에서의 층응답스펙트럼의 선정

구조물 내부에 설치된 기기의 내진성능 평가는 지진취약도 분석이나 내진여유도 분석 방법을 이용하여 평가한다. 기기의 내진성능을 평가하기 위해서는 기기가 설치된 지점에서의 층응답 스펙트럼에 해당하는 요구응답스펙트럼(Required Response Spectrum)과 기기의 내진성능검증 또는 경험자료 등으로부터 얻은 시험응답스펙트럼(Test Response Spectrum)이 필요하다. 내진성능은 이 두 스펙트럼을 비교하여 여유도를 산정하게 되는 것이다.

지진 취약도 분석 시 기준 지진동의 형상이 설계기준 지진동과 크게 달라지게 될 경우

두 스펙트럼 형상의 차이는 구조물의 응답계수 중 스펙트럼 형상계수로 고려하게 된다. 그러나 달라진 스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼의 변화는 일반적으로 별도로 고려하지 않고 있다. 이를 위해서는 기준지진동에 따른 층응답스펙트럼을 다시 작성해야 하기 때문이다.

내진여유도 평가에서는 기기의 내진성을 평가하기 위해 SME(Seismic Margin Earthquake) 또는 RLE(Review Level Earthquake)의 수준 및 형상에 따라 기존의 설계 시에 작성된 층응답스펙트럼을 스케일링하여 평가를 수행한다. 일반적으로 층응답스펙트럼을 스케일링 하는 것이 구조물의 응답을 스케일링 하는 것에 비해 매우 복잡하다. 종종 설계기준 지진동에 대해 작성된 층응답스펙트럼 보다 높은 감쇠비를 갖는 기기에 대한 층응답스펙트럼의 작성이 요구되기도 한다[5]. 기준 지진동에 따라 새로운 층응답스펙트럼을 작성하는 것이 설계 지진동 이상의 지진에 대한 내진 여유도를 평가하는데 가장 효율적인 방법중의 하나이다. 많은 경우 기존의 스펙트럼을 스케일링 하는 것보다 새로운 해석에 의해 새로운 층응답스펙트럼을 작성하는 것이 필요하게 된다.

일반적으로 내진여유도 분석에서 다음의 경우에는 SME에 대한 층응답스펙트럼을 새로운 해석을 통해 작성하는 것이 바람직하다.

- 복합모드감쇠비에 큰 변화가 있는 토질지반
- 기하학적 감쇠가 크게 증가하는 토질지반
- SME 지반응답스펙트럼과 SSE 지반응답스펙트럼의 형상이 크게 다른 경우

또한 SME에 대해 층응답스펙트럼을 스케일링 할 경우 입력진동의 공간적 incoherence에 의한 응답감소가 일어날 수 있다. 그러나 구조물에 심각한 비선형 거동이 발생할 경우 고진동수 영역에서 층응답스펙트럼의 증가가 발생될 수 있으며, 이 경우 층응답스펙트럼의 작성을 위해서는 재해석이 바람직하다.

3. 층응답스펙트럼의 작성방법

새로운 층응답스펙트럼의 작성에는 일반적으로 두 가지 방법이 사용된다. 첫 번째로 일반적인 시간이력해석에 의한 방법이고, 두 번째는 랜덤진동기법을 이용하여 층응답스펙트럼을 직접 작성하는 방법이다. 이중 시간이력 해석에 의해 층응답스펙트럼을 산정하는 것이 해석적으로 정확하다고 볼 수 있으나 실질적인 입력지진동의 시간이력을 결정하기 매우 곤란하기 때문에 설계나 내진성능 평가 측면에서 불합리하다고 볼 수도 있다. 또한 이 방법은 층응답 스펙트럼의 산정에 많은 시간과 노력이 요구된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 설계 응답스펙트럼으로부터 직접 층응답스펙트럼을 구하기 위한 연구가 수행되기 시작하였으며, 최초로 Biggs[6]에 의해 개발되었다. 이후 많은 연구자들에 의해 다양한 방법이 개발되었다. 본 연구에서는 고진동수 특성을 갖는 지진동이 층응답 스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기 위해 기 개발된 방법 중 Singh[7-9]에 의해 개발된 방법을 이용하여 직접 층응답스펙트럼을 작성하였다.

지반에서의 응답스펙트럼으로부터 층응답스펙트럼을 구하기 위해 먼저 구조물에 대한 고유치 해석을 통해 구조물의 고유진동수, 모드형상 및 모드기여도계수를 산정한다. 고유

치 해석 결과를 이용하여 임의진동수에서의 층응답 스펙트럼은 다음의 식을 사용하여 구할 수 있다[7-9].

$$\begin{aligned}
 R_u^2(\omega_0) = & \sum_{j=1}^N \gamma_j^2 \phi_j^2(u) \{ [(A_j + F(\omega_0)B_j)I_1(\omega_0) + [C_j + F(\omega_j)D_j]I_1(\omega_j)] \\
 & + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{k=j+1}^N \gamma_j \gamma_k(u) \phi_k(u) \{ [A'_{jk} + F(\omega_0)B'_{jk}]I_1(\omega_0) \\
 & + [C'_{jk} + F(\omega_j)D'_{jk}]I_1(\omega_j) + [E'_{jk} + F(\omega_k)F'_{jk}]I_1(\omega_k) \} \}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $R_u(\omega_0)$ 는 u 층에서의 ω_0 에 대한 응답스펙트럼 값을 나타내며, N 은 해석에 고려한 주요 모드의 개수를 나타낸다. γ_j 는 j 번째 모드의 기여도계수를 나타내며, $\phi_j(u)$ 는 u 층에서의 j 번째 모달 변위를 나타낸다. A_j , B_j , A'_{jk} 및 B'_{jk} 등은 j 및 k 번째 모드에 의한 증폭계수로 구조물의 진동수 및 감쇠에 따라 결정되는 값으로 참고문헌 [5]에 상세히 기술되어 있다. 또한 $F(\omega_j)$ 는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$F(\omega_j) = \frac{I_2(\omega_j)}{I_1(\omega_j)} \quad (2)$$

$$I_1(\omega_j) = C^2 \int \omega_j^4 \Phi_g(\omega) |H(\omega_j)|^2 d\omega \quad (3)$$

$$I_2(\omega_j) = C^2 \int \omega_j^2 \omega^2 \Phi_g(\omega) |H(\omega_j)|^2 d\omega \quad (4)$$

여기서 C 는 첨두계수(Peak Factor)를 나타내며, $\Phi_g(\omega)$ 는 지반가속도의 PSDF(Power Spectral Density Function)을 나타낸다. 또한 $H(\omega_j)$ 는 주파수 응답함수(Frequency Response Function)을 나타낸다.

4. 고진동수 지진동의 영향 평가

본 연구에서는 기준 스펙트럼의 형상이 달라짐에 따른 층응답스펙트럼의 변화를 평가하기 위해 기존의 우리나라 원전 지진취약도 분석에 사용된 고리원전 부지의 고유 응답 스펙트럼과 우리나라 원전부지의 지진재해도 평가 결과를 이용한 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum)에 의한 층응답스펙트럼의 변화 양상을 평가하였다.

4.1 기준 취약도 분석에서의 층응답스펙트럼 영향 평가

지금까지 우리나라 원전에 대한 지진취약도 분석에서는 과거에 작성된 고리 부지에 대한 부지고유 응답스펙트럼이 사용되어 왔다. 건물 내에 설치된 기기의 취약도 분석에서는 설계응답스펙트럼과 고리 부지고유 응답스펙트럼의 형상 차이를 구조물의 스펙트럼

형상계수에 적용하여 사용하여 왔으며, 스펙트럼 형상의 변화에 따른 층응답 스펙트럼의 변화에 대한 영향을 별도로 고려하지 않았다. 일반적으로 구조물 내부 각 층에서의 응답은 구조물의 고유진동수에 따른 응답이 지배적으로 나타남으로 인해 고진동수 특성을 갖는 기기에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 평가되어 왔다[4].

기준응답스펙트럼의 변화에 따른 층응답스펙트럼의 변화를 평가하기 위해 본 연구에서는 대상구조물로 그림 1과 같은 전형적인 원전 격납건물의 외부 쉘 및 격납건물 내부 구조물을 집중질량 모델로 모델링 한 해석모델을 사용하였다. 또한 격납건물의 고유치 해석결과는 표 1과 같다[10].

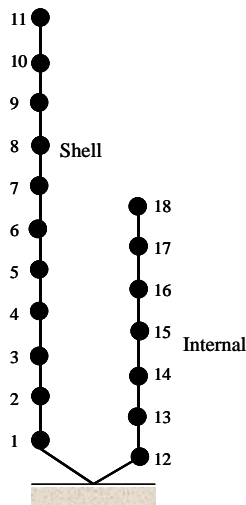


표 1. 해석모델의 동적특성

Mode No.	Natural Frequency (Hz)	Modal Participation Factor
1	4.73	-28.074
2	12.35	20.325
3	15.40	16.326
4	24.40	-10.843
5	26.86	1.036
6	27.80	-10.549
7	30.45	-8.084
8	44.31	5.585
9	45.93	-0.514
10	47.33	11.054

그림 1. 격납건물 집중질량 해석모델

지반에서의 응답스펙트럼으로부터 건물 내부 층응답스펙트럼을 직접 산정하기 위하여 FARSII[11] 프로그램을 사용하였다. 그림 2에 설계응답 스펙트럼인 US NRC Regulatory Guide 1.60[1]의 표준응답 스펙트럼과 고리 부지고유 응답스펙트럼을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 3Hz 이상의 진동수 영역에서는 설계 응답스펙트럼과 매우 유사한 형상을 보여주고 있다. 특히 원전 내부에 설치된 기기가 주로 분포하고 있는 10Hz 이상에서는 거의 유사한 값을 나타내고 있으며 설계 응답스펙트럼에 비해 작은 값을 나타내고 있다. 따라서 기기의 내진성능 평가에 사용되는 층응답스펙트럼에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단할 수 있으며, 고진동수 영역에서의 스펙트럼 값이 설계 응답스펙트럼에 비해 작은 값을 나타내고 있어 설계 응답스펙트럼을 이용하여 작성한 층응답스펙트럼에 의해 내진성능을 평가할 경우 보수적인 결과를 줄 것으로 판단할 수 있다.

모델 구조물에 설계 응답스펙트럼 및 고리 부지고유 스펙트럼을 입력으로 하였을 경우 격납건물 외벽 최상부(절점 11) 및 내부 구조물 최상부(절점 18)에서의 층응답스펙트럼 및 증폭계수를 각각 그림 3~6에 각각 나타내었다. 또한 두 입력 스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼 값의 비를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 보는 바와 같이 구조물의 고유진동수가 위치하고 있는 저진동수 영역에서는 설계 응답스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼 값이 매우 크게 나타나고 있으나 5Hz 이상에서는 설계응답 스펙트럼에 의한 층응답

스펙트럼이 약 10% 정도 크게 나타났다. 따라서 설계 응답스펙트럼과 기준 응답스펙트럼의 형상 차이에 따른 층응답스펙트럼에 미치는 영향은 크지 않으며 설계해석 시 작성한 층응답스펙트럼을 기준으로 내진성능을 평가하는 것이 보수적인 결과를 주는 것으로 나타났다.

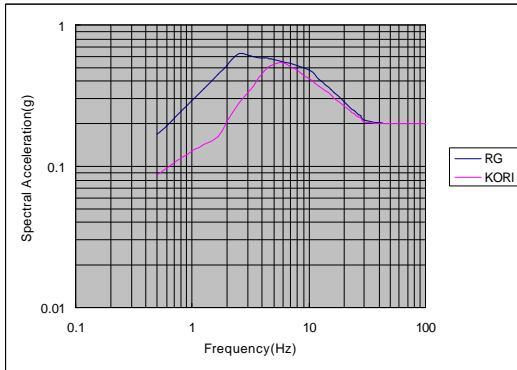


그림 2. 입력 스펙트럼 비교(R.G. & KORI)

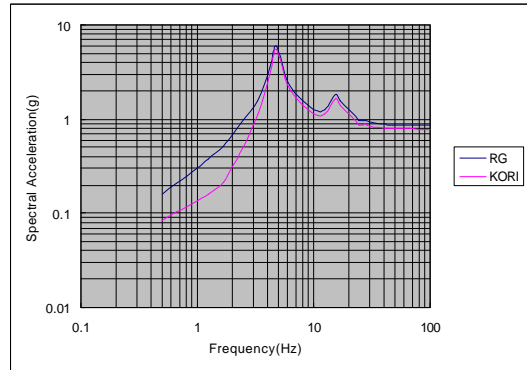


그림 3. 층응답 스펙트럼 비교(Node 11)

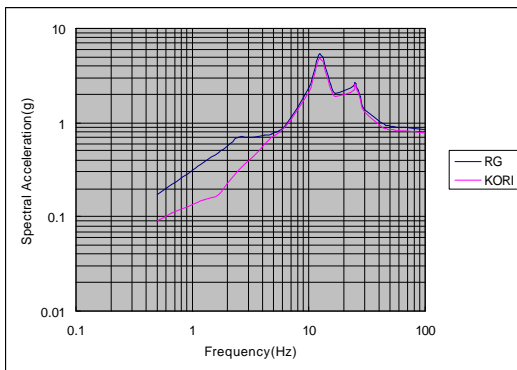


그림 4. 층응답 스펙트럼 비교(Node 18)

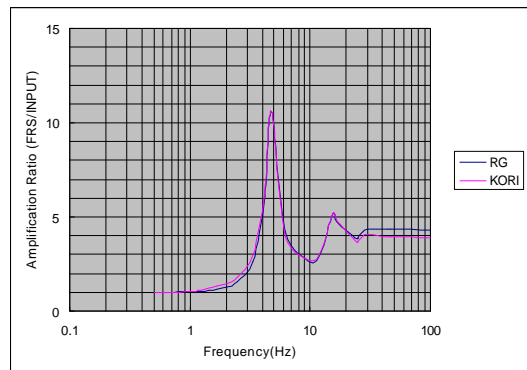


그림 5. 증폭계수의 비교(Node 11)

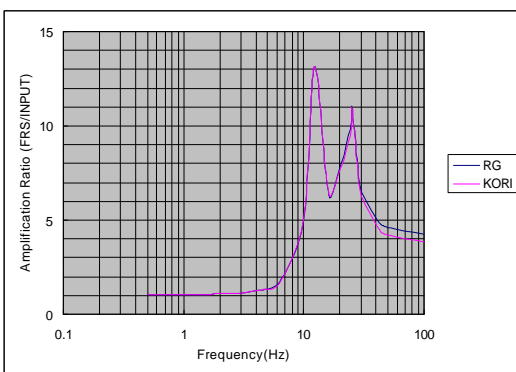


그림 6. 증폭계수의 비교(Node 18)

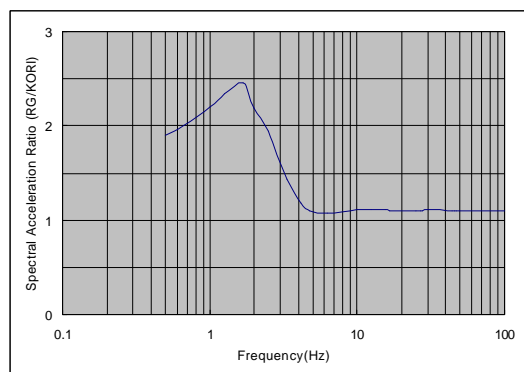


그림 7. 층응답 가속도 비(Node 11)

4.2 고진동수 지진동의 영향 평가

고진동수 특성을 갖는 지진동이 층응답 스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기 위하여 기존 국내 원전 부지의 확률론적 지진재해도 결과를 이용하여 작성한 등재해도 스펙트럼을 이용하였다. 앞서 기술한 바와 같이 우리나라 및 미국 동부지역에서의 등재해도 스펙트럼은 고진동수 영역에서의 응답이 매우 크게 나타나므로 원전 구조물 및 기기의 내진성능 평가 시 고진동수 지진동의 영향을 평가하여 적절히 고려하여야 한다. 그림 8에 원전 구조물의 설계 및 층응답 스펙트럼 작성에 사용된 설계 응답스펙트럼인 US NRC Regulatory Guide 1.60 표준응답스펙트럼과 등재해도 스펙트럼을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 10Hz 이하의 저진동수 영역에서는 설계 응답스펙트럼이 매우 크게 나타났으며 10Hz 이상의 고진동수 영역에서는 등재해도 스펙트럼 값이 매우 크게 나타났다. 원전 주요 구조물의 고유진동수가 대부분 10Hz 이하이므로[2,4] 등재해도 스펙트럼에 의한 구조물의 손상확률은 크게 저하될 것으로 판단된다. 그러나 전기기기 등 고진동수 지진동에 민감한 기기의 구조적 또는 기능적 파괴확률이 크게 증가될 가능성이 있다.

그림 9와 10에 격납건물 외벽 및 내부구조물의 정점에서의 층응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물 외벽에서는 등재해도 스펙트럼에 의한 응답이 전체적으로 작게 나타났으나 격납건물 내부구조물에서는 입력 스펙트럼의 크기가 역전되는 10Hz를 기준으로 등재해도 스펙트럼에 의한 값이 크게 나타났다. 이는 격납건물의 외벽에 비해 내부구조물의 고유진동수가 커서 고진동수 영역에서 크게 증폭되기 때문이다.

그림 11과 12에는 각각 격납건물 외벽 및 내부구조물의 정점에서의 응답 스펙트럼의 증폭율을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물 외벽에서는 전체적으로 등재해도 스펙트럼에 의한 응답이 작게 나타났으며, 내부 구조물에서는 고진동수 영역에서 큰 증폭율을 보여주고 있다. 특히 40Hz 이상의 고진동수에서는 매우 크게 증폭되는 것으로 나타났다.

격납건물 외벽 및 내부구조물의 정점에서의 US NRC Regulatory Guide 1.60에 의한 스펙트럴 가속도와 등재해도 스펙트럼에 의한 스펙트럴 가속도의 비를 그림 13 및 14에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물 외벽에서는 등재해도 스펙트럼에 의한 값이 대체적으로 작게 나타났으나 내부 구조물에서는 10Hz 이상의 고진동수 영역에서 크게 나타났다.

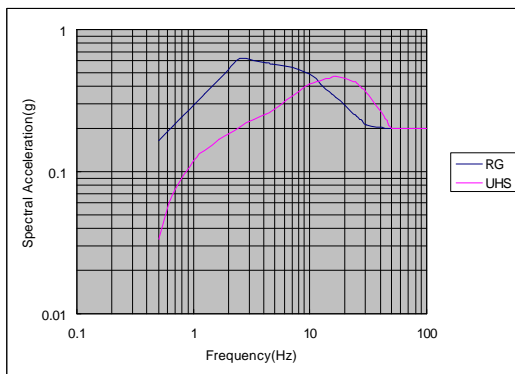


그림 8. 입력 스펙트럼 비교(R.G. & UHS)

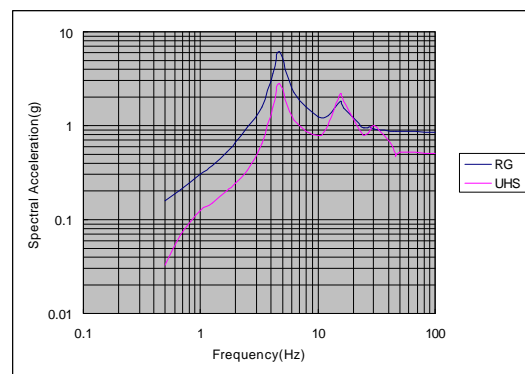


그림 9. 층응답 스펙트럼 비교(Node 11)

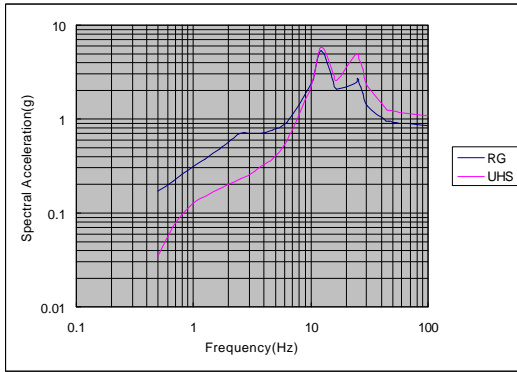


그림 10. 응답 스펙트럼 비교(Node 18)

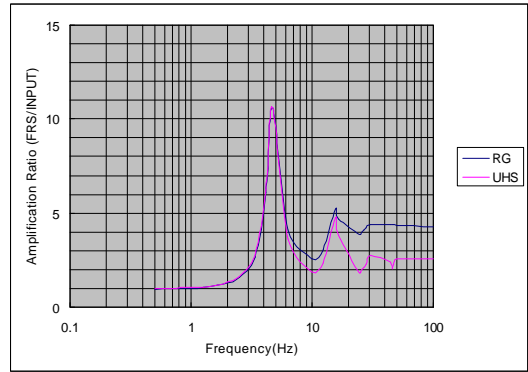


그림 11. 증폭계수의 비교(Node 11)

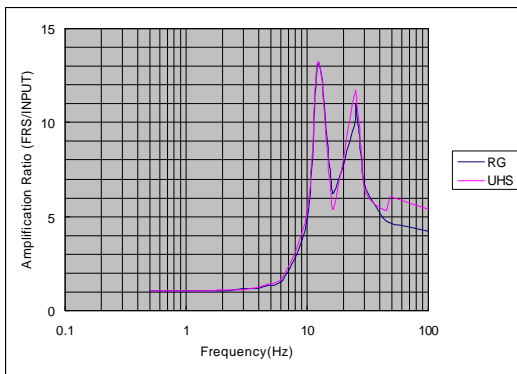


그림 12. 증폭계수의 비교(Node 18)

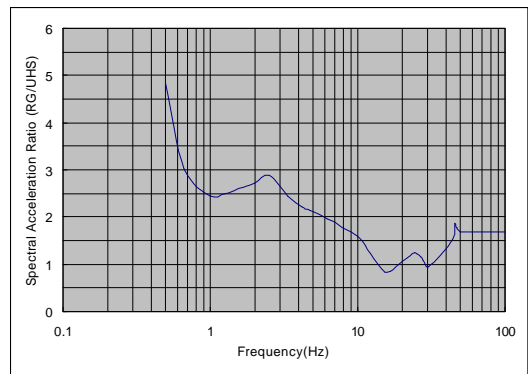


그림 13. 응답 가속도 비(Node 11)

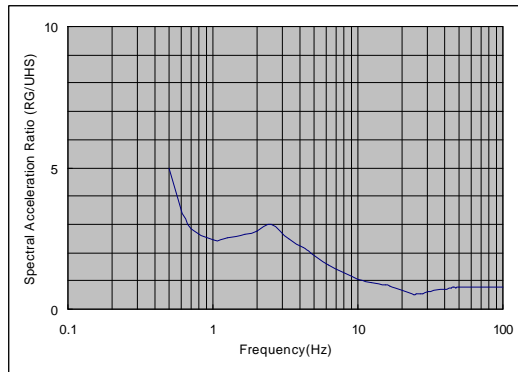


그림 14. 응답 가속도 비(Node 18)

특히 24Hz에서는 등재해도 스펙트럼에 의한 응답 스펙트럼의 가속도가 2배 이상 크게 나타났으며 40Hz 이상에서는 25% 이상 크게 나타났다.

이상의 결과로 미루어 보아 구조물의 고유진동수가 낮을 경우 고진동수 성분에 의한 고진동수 특성을 갖는 지진동의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 구조물의 고유진동수가 큰 구조물에서는 고진동수 특성이 응답스펙트럼에 크게 영향을 미치는 것으

로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 입력스펙트럼의 진동수 특성이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 지반에서의 응답스펙트럼으로부터 직접 층응답스펙트럼을 구하는 방법을 이용하여 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 지진취약도 분석이나 내진여유도 평가에서 사용되어온 고리원전 부지의 스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼의 변화는 구조물의 진동수 특성에 따른 스펙트럼 형상계수와 유사한 값을 보여주고 있으며 고진동수 영역의 층응답스펙트럼에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.
- 고진동수 성분이 우세한 입력지진이 층응답스펙트럼에 미치는 영향은 구조물의 기본진동수에 따라 크게 차이가 나는 것으로 나타났다. 특히 구조물의 고유진동수가 클 경우 고진동수 입력에 의한 층응답스펙트럼의 증폭이 매우 크게 나타났다.
- 일반적으로 지진취약도 분석이나 내진여유도 평가에서는 설계지진과는 다른 응답스펙트럼을 사용하게 된다. 따라서 두 스펙트럼의 형상이 크게 차이가 날 경우에는 반드시 층응답스펙트럼을 새로 작성하여 구조물이나 기기의 내진성능을 평가하는 것이 바람직하다.
- 우리나라의 지진 특성이 고진동수 성분이 매우 우세한 것으로 밝혀지고 있어 추후 구조물 및 기기의 내진성능 평가 시에는 이러한 고진동수 지진동 특성이 전기기기와 같이 고진동수 성분에 민감한 기기의 구조적, 기능적 파괴에 미치는 영향을 반드시 고려하여 평가하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
2. J. W. Reed, R. P. Kennedy, and B. Lashkari, Analysis of High-Frequency Seismic Effects, EPRI TR-102470, 1993.
3. R. K. McGuire, W. J. Silva, and C. J. Costantino, Technical Basis for Revision of Regulatory Guidance on Design Ground Motions : Hazard- and Risk-consistant Ground Motion Spectra Guidelines, NUREG/CR-6728, 2001.
4. 최인길, 전영선, 연관희, “등재해도 스펙트럼을 이용한 지진취약도 분석,” 한국원자력학회 2002년 춘계학술발표회, 2002.
5. J. W. Reed, R. P. Kennedy, D. R. Buttemer, I. M. Idriss, D. P. Moore, T. Barr, K. D. Wooten, and J. E. Smith, A Methodology for Assessment of Nuclear Power

- Plant Seismic Margin (Revision 1), EPRI NP-6041-SL, 1991.
6. Biggs, J. M., "Seismic Response Spectra for Equipment Design in Nuclear Power Plants," Proceedings 1st International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, Germany, Paper K4/7, 1971.
 7. M. P. Singh, "Generation of Seismic Floor Spectra," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 101, No. EM5, 1975.
 8. M. P. Singh, and A. M. Sharma, "Seismic Floor Spectra by Mode Acceleration Approach," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 111, No. 11, 1985.
 9. M. P. Singh, "Seismic Design Input for Secondary Systems," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST2, 1980.
 10. S. P. Chang, J. M. Seo, J. Kim, and J. R. Lee, "Effects of PSDF Forms on Floor Response Spectra Generation in Direct Solution Method," Transaction of SMiRT 11, Vol. K, K10/3, 1991.
 11. M. P. Singh, Program for Direct Generation of Floor Acceleration Response Spectra with or without Interaction (FARSI)