

스펙트럼 형상이 원전 기기 지진취약도에 미치는 영향 평가

Evaluation of Response Spectrum Shape Effect on Seismic Fragility of NPP Component

최 인 길* 서 정 문** 전 영 선** 이 종 립**
Choi, In Kil Seo, Jeong Moon Choun, Young Sun Lee, Jong Rim

국문요약

최근 수행된 우리나라 원전 부지에 대한 지진재해도 해석 결과 작성된 등재해도 스펙트럼에서 고진동수 성분의 지진동이 매우 우세하게 나타나고 있다. 일반적으로 지진취약도 해석에서는 설계 스펙트럼에 내재된 보수성을 평가하기 위해 스펙트럼 형상계수가 사용된다. 본 연구에서는 입력지반운동 스펙트럼의 형상이 변화함에 따른 층응답스펙트럼의 형상 변화를 분석하였다. 이때 입력 스펙트럼으로부터 직접 층응답스펙트럼을 작성할 수 있는 직접법을 사용하였다. 본 연구 결과 건물 내부에 설치된 기기의 취약도해석에서는 입력스펙트럼에 내재된 보수성을 구조물의 고유진동수에 대한 스펙트럼 형상계수가 아닌 기기의 고유진동수에 따른 층응답스펙트럼 형상계수로 고려하는 것이 정확한 취약도해석 결과를 주는 것으로 나타났다.

주요어 : 지진취약도, 스펙트럼 형상계수, 입력지반운동, 층응답스펙트럼

ABSTRACT

The result of recent seismic hazard analysis indicates that the ground motion response spectra for Korean nuclear power plant site have relatively large high frequency acceleration contents. In the ordinary seismic fragility analysis of nuclear power plant structures and equipments, the safety margin of design ground response spectrum is directly used as a response spectrum shape factor. 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. The safety margin included in the design ground response spectrum should be considered as a floor response spectrum shape factor for the seismic fragility analysis of the equipments located in a building.

Key words : seismic fragility, spectrum shape factor, input ground motion, floor response spectrum

1. 서 론

원전의 종합적인 안전성을 평가하기 위한 수단으로 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment : PSA)를 수행하여 왔다. PSA 수행의 일환으로 외부사건(External Event)에 대한 안전성을 평가하기 위해 지진, 홍수 및 화재 등에 대한 원전의 안전성 평가가 수행되고 있으며 특히 지진에 대한 안전성 평가가 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 원전 구조물 및 기기의 내진안전성을 평가하기 위한 방법으로 지금까지 SPRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment) 또는 SMA(Seismic Margin Analysis)를 수행하여 왔다. 이들 방법은 설계시의 보수적인 설계로 인하여 설계강도, 입력 지진, 동적 해석방법 등에 포함된 안전율을 현실적으로 평가하여 실제 원전 구조물 및 기기가 가지는 객관적인 안전성을 확률론적 또는 결정론적으로 평가하는 데 그 바탕을 두고 있다.

우리나라 원전 구조물 및 기기의 내진설계에는 US NRC R.G. 1.60⁽¹⁾에서 제시하고 있는 표준응답스펙트럼을 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake : SSE) 수준으로 스케일

링하여 사용하고 있다. 이 표준응답스펙트럼은 강지진대에 속하는 미국 서부에서 발생한 강진기록을 이용하여 작성한 것으로 최근 수행된 확률론적 지진재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis : PSHA) 결과 미국 동부지역이나 우리나라의 지반응답 스펙트럼에 비해 저진동수 영역에서는 매우 큰 값을 보이고 있으며 고진동수 영역에서는 낮은 값을 보여주고 있다.⁽²⁾⁻⁽⁴⁾ SPRA나 SMA에서는 이러한 설계지진에 대한 여유도를 평가하기 위해 평가용 기준지진의 설정이 필요하다. 일반적으로 부지고유 응답스펙트럼이나 등재해도 스펙트럼 등이 기준지진으로 사용되며 이때 SPRA에서는 중앙값(Median) 스펙트럼이 사용되고 SMA에서는 설계에서의 마찬가지로 비초과확률(Non-exceedance Probability) 84%의 스펙트럼이 사용된다.

우리나라에서 발생한 지진기록의 분석 및 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석 결과 기존의 설계스펙트럼에 비해 고진동수 영역에서 매우 큰 값을 보여주고 있다. 이러한 경향은 미국 중동부 지역에서와 매우 유사한 것으로 미국 서부 지역에 비해 저진동수 영역에서의 가속도 증폭은 작게 나타났으나 고진동수 영역에서는 매우 크게 증폭되는 것으로 나타났다. 이를 위해 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 고진동수 지진파의 영향에 대한 평가를 수행한 바 있으며⁽²⁾, 이 연구를 통하여 기기의 용접부의 비선형 거동을 고려한 입력스펙트럼의 수정법을 SMA 수행을 위해

* 정회원 · 한국원자력연구소 선임연구원(대표저자 : cik@kaeri.re.kr)

** 정회원 · 한국원자력연구소 책임연구원

*** 정회원 · 한전 전력연구원 실장

본 논문에 대한 토의를 2003년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 3. 27 / 심사종료일 : 2003. 7. 25)

제시한 바 있다. 일반적으로 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 평가대상에서 제외하였다.

본 연구에서는 기존의 원전 기기에 대한 지진취약도 평가 방법을 분석하고, 고진동 입력 지진동이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하여 고진동수 입력지진의 영향을 지진취약도 분석에 합리적으로 고려할 수 있는 방안을 제시하였다. 고진동수 지진동이 층응답스펙트럼에 미치는 영향에 대한 평가는 입력 스펙트럼으로부터 랜덤진동이론을 이용하여 직접 층응답스펙트럼을 평가할 수 있는 방법을 이용하여 평가하였다.

2. 원전 기기의 지진취약도 분석

일반적으로 원전 기기의 지진취약도 계산에서는 안전계수 (Factor of Safety)로 불리는 일련의 랜덤변수를 이용하여 내진성능을 평가한다. 설계시의 SSE 수준을 초과하는 중앙값 지반가속도 내력 (Median Ground Acceleration Capacity)은 기기의 성능 및 응답관련 변수 뿐 아니라 구조물의 응답관련 변수를 포함하는 일련의 안전계수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$A_m = F \cdot A_{SSE} \tag{1}$$

여기서, A_m 및 A_{SSE} 는 각각 중앙값 지반가속도 내력 및 SSE 하중의 최대지반가속도를 나타낸다. 이 식에서 안전계수 F 는 기기의 성능 및 응답관련 변수와 구조물의 응답관련 변수를 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = F_{EC} \cdot F_{RS} \cdot F_{ES} \tag{2}$$

여기서, F_{EC} 는 기기의 성능계수이며 여기에는 기기의 강도 및 비탄성에너지 흡수계수가 포함된다. F_{RS} 는 구조물의 응답계수를 나타내며 F_{ES} 는 기기의 구조물에 대한 상대응답과 관련된 보수성을 고려하기 위한 변수이다. 구조물 및 기기의 지진취약도 분석에 사용되는 응답 및 성능관련 변수를 요약하여 정리하면 다음의 표 1과 같다.⁽⁶⁾

안전계수의 랜덤성 및 불확실성에 대한 대수표준편차는 이들 각각의 계수에 대한 대수표준편차를 다음 식과 같이 SRSS(Square Root of the Sum of the Squares) 방법으로 구한다.

$$\beta_R = [\sum (\beta_r)_i^2]^{1/2} \tag{3}$$

$$\beta_U = [\sum (\beta_u)_i^2]^{1/2} \tag{4}$$

여기서, i 는 성능 및 응답관련 안전계수를 나타내며 β_r 및

표 1. 구조물 및 기기의 지진취약도 평가에 고려하는 변수⁽⁶⁾

Structure	Capacity	Strength(Yield or Ultimate), Inelastic Energy Absorption
	Response	Ground Response Spectra Foundation-Structure Interaction(Including Soil-Structure Interaction, Deconvolution & Incoherence) Damping Frequency Mode Shape Torsional Coupling Mode Combination Time History Simulation Earthquake Component Combination
Equipment (Qualified by Analysis)	Equipment Capacity	Strength(Yield or Ultimate) or Test Capacity Inelastic Energy Absorption
	Building Structure Response	(See above)
	Equipment Response	Qualification Method Damping Frequency Mode Shape Mode Combination Earthquake Component Combination
Equipment (Qualified by Testing)	Equipment Capacity	Test Capacity
	Building Structure Response	(See above)
	Equipment Factors	Response Clipping Capacity Increase and Demand Reduction Cabinet Amplification Multi-Axis to Single-Axis Conservatism Broad Frequency Input Spectrum Device Capacity

β_u 는 이들 계수 각각의 랜덤성 및 불확실성에 대한 대수표준편차를 나타낸다.

3. 입력 스펙트럼의 보수성 평가

SPRA에서는 가속도 또는 속도 등의 지반운동 변수에 고정된 평활화한 응답스펙트럼을 이용하여 두 수평방향의 평가용 입력지진을 선정한다. 부지에 대한 지진정보가 충분할 경우에는 부지 고유의 스펙트럼(Site-Specific Spectrum)을 사용하거나 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum : UHS)을 사용하는 것이 바람직하다. 이 경우 지반운동 변수의 변동성에 대한 불확실성 β_u 가 작아지게 된다. 그러나 부지에서의 지진정보가 충분하지 않거나 적절히 평가되어 있지 않은 경우에는 NUREG/CR-0098⁽⁷⁾의 중앙값 스펙트럼 등을 사용하는 것이 일반적이다. 설계지진으로 사용된 표준 응답스펙트럼의 경우 중앙값 스펙트럼이 아닌 84% 비초과 확률 수준의 스펙트럼으로 정의되어 있다. 따라서 설계 스펙트럼과 중앙값 스펙트럼 사이에는 어느 정도의 여유도를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 지진취약도 분석에서는 설계 시 사용된 입력 스펙트럼의 보수성을 평가하기 위해 스펙트럼 형상계수가 사용된다. 스펙트럼 형상계수는 부지 고유의 응답스펙트럼 또는 등재해도 스펙트럼으로 정의된 중앙값 응답스펙트럼과의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{SS} = \frac{S_{ad}}{S_{am}} \quad (5)$$

여기서, S_{ad} 와 S_{am} 은 각각 설계 응답스펙트럼의 스펙트럴 가속도 및 평가용 중앙값 스펙트럼의 스펙트럴 가속도를 나타낸다. 이때 각각의 감쇠값은 동일한 값을 사용하며 F_{SS} 는 구조물 고유진동수의 함수가 된다.⁽⁶⁾

지금까지 원전 기기에 대한 지진취약도 분석에서는 설계 응답스펙트럼과 평가용 기준스펙트럼의 형상 차이를 구조물의 스펙트럼 형상계수에 적용하여 사용하여 왔으며, 스펙트럼 형상의 변화에 따른 응답스펙트럼의 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.^{(8),(9)} 따라서 기존의 연구⁽⁹⁾에서는 이러한 영향을 별도로 고려하지 않았다.

4. 고진동수 지진동의 영향 평가

건물 내부에 설치된 기기의 지진취약도 분석에서는 앞서 기술한 바와 같이 기기의 성능 및 응답관련 변수와 기기가 설치된 건물의 응답관련 변수를 이용하여 수행한다. 기기의 성능관련 변수는 기기가 설치된 지점에서의 응답스펙트럼을 이용하여 평가한다. 기기의 응답관련 변수는 기기의 검증 방법에 따라 표 1에서 제시한 변수들을 적절히 고려하여 평가하게 된다. 기기의 취약도 평가에서 구조물의 응답관련 변

수 중 평가용 지진동과 설계기준 지진동의 두 스펙트럼 형상의 차이는 스펙트럼 형상계수로 고려한다. 그러나 두 스펙트럼의 형상이 크게 달라 응답스펙트럼에서의 형상이 크게 변화할 경우에도 스펙트럼 형상계수만을 이용하여 평가하는 것이 일반적이며 달라진 스펙트럼에 의한 응답스펙트럼의 변화는 별도로 고려하지 않고 있다. 본 연구에서는 고진동수 지진동이 응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기 위해 입력지진동의 형상이 크게 달라질 경우의 응답스펙트럼의 변화를 다양한 입력지진동 스펙트럼을 이용하여 평가하였다.

4.1 응답스펙트럼의 작성방법

응답스펙트럼의 작성에는 일반적으로 두 가지 방법이 사용된다. 첫 번째로 일반적인 시간이력해석에 의한 방법이고, 두 번째는 랜덤진동기법을 이용하여 응답스펙트럼을 직접 작성하는 방법이다. 이중 시간이력 해석에 의해 응답스펙트럼을 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 응답스펙트럼의 산정에 많은 시간과 노력이 요구된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 설계 응답스펙트럼으로부터 직접 응답스펙트럼을 구하기 위한 연구가 수행되기 시작하였으며, 최초로 Biggs⁽¹⁰⁾에 의해 개발되었다. 이후 많은 연구자들에 의해 다양한 방법이 개발되었다. 본 연구에서는 고진동수 특성을 갖는 지진동이 응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기 위해 기존에 개발된 방법 중 Singh⁽¹¹⁻¹⁴⁾에 의해 개발된 방법을 이용하여 직접 응답스펙트럼을 작성하였다. 이 방법을 이용할 경우 기존의 설계해석 자료를 최대한 활용할 수 있다는 장점이 있다.

지반에서의 응답스펙트럼으로부터 응답스펙트럼을 구하기 위해 먼저 구조물에 대한 고유치 해석을 통해 구조물의 고유진동수, 모드형상 및 모드기여도계수를 산정한다. 이러한 고유치 해석결과는 설계해석 자료로부터 손쉽게 얻을 수 있다. 고유치 해석 결과를 이용하여 임의진동수에서의 응답스펙트럼은 다음의 식을 사용하여 구할 수 있다.⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁴⁾

$$R_u^2(\omega_0) = \sum_{j=1}^N \gamma_j^2 \psi_j^2(u) \{ [A_j + F(\omega_0)B_j]I_1(\omega_0) + [C_j + F(\omega_j)D_j]I_1(\omega_j) \} + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{k=j+1}^N \gamma_j \gamma_k \psi_k(u) \{ [A'_{jk} + F(\omega_0)B'_{jk}]I_1(\omega_0) + [C'_{jk} + F(\omega_j)D'_{jk}]I_1(\omega_j) + [E'_{jk} + F(\omega_k)F'_{jk}]I_1(\omega_k) \} \quad (6)$$

여기서, $R_u(\omega_0)$ 는 u 층에서의 진동수 ω_0 에 대한 응답스펙트럼 값을 나타내며, N 은 해석에 고려한 주요 모드의 개수를 나타낸다. γ_j 및 γ_k 는 각각 j 번째 및 k 번째 모드의 기여도 계수를 나타내며, $\psi_j(u)$ 는 u 층에서의 j 번째 모달 변위를 나타낸다. 또한 ω_j 및 ω_k 는 j 번째 및 k 번째 구조물 진동수

를 나타내며, A_j, B_j, C_j, D_j 및 $A_{jk}, B_{jk}, C_{jk}, D_{jk}, E_{jk}, F_{jk}$ 는 j 및 k 번째 모드에 의한 증폭계수로 구조물의 진동수 및 감쇠에 따라 결정되는 값으로 참고문헌 [11]에 상세히 기술되어 있다. 또한 $F(\omega_j)$ 는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$F(\omega_j) = \frac{I_2(\omega_j)}{I_1(\omega_j)} \quad (7)$$

$$I_1(\omega_j) = C^2 \int \omega_j^4 \Phi_g(\omega) |H(\omega_j)|^2 d\omega \quad (8)$$

$$I_2(\omega_j) = C^2 \int \omega_j^2 \omega^2 \Phi_g(\omega) |H(\omega_j)|^2 d\omega \quad (9)$$

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

$$H(\omega_j) = \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2) + 2i\beta_j\omega_j\omega} \quad (10)$$

여기서 β_j 는 j 번째 모드의 감쇠계수를 나타내며, $i = \sqrt{-1}$ 이다.

4.2 고진동수 지진동의 영향 평가

본 연구에서는 기준 스펙트럼의 형상이 달라짐에 따른 층응답스펙트럼의 변화를 평가하기 위해 기존의 우리나라 원전 지진취약도 분석에 사용된 고리원전 부지의 고유 응답스펙트럼과 우리나라 원전부지의 지진재해도 평가 결과를 이용한 등재해도 스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼의 변화 양상을 평가하였다. 해석에 사용된 평가용 입력 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼인 US NRC R.G. 1.60 스펙트럼과 함께 그림 1에 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 설계스펙트럼과 부지고유 스펙트럼의 경우 고진동수 영역에서

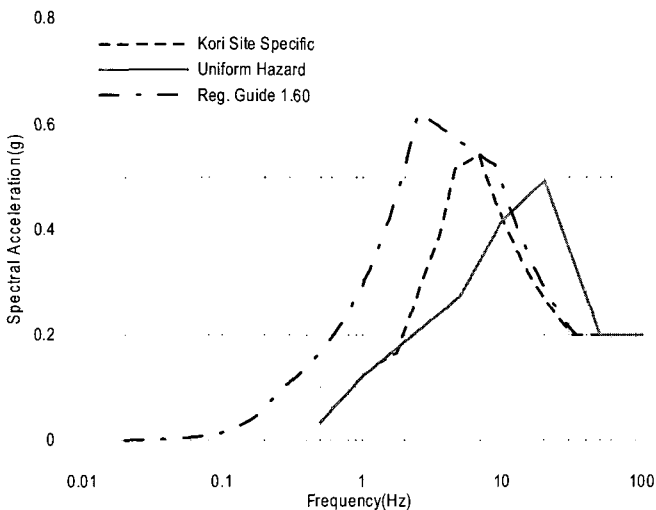


그림 1 입력 응답스펙트럼 비교

매우 유사한 형태를 보여주고 있으나 등재해도 스펙트럼의 경우 저진동수 영역에서는 설계스펙트럼에 비해 매우 작은 값을 가지나 10Hz 이상의 고진동수 영역에서는 매우 큰 증폭 특성을 보여주고 있다.

그림 2와 그림 3에는 설계스펙트럼과 평가용 스펙트럼의 비를 보여주고 있다. 이러한 비가 곧 취약도 분석에서 스펙트럼 형상계수에 해당된다. 지진취약도 분석에서는 구조물의 고유진동수에 따라 스펙트럼 형상계수를 취하게 된다. 부지고유 스펙트럼과의 비교에서는 5Hz 이상에서 대체로 1.0에 근접된 값을 보여주고 있다. 그러나 그림 3의 UHS와의 비교에서는 10Hz 이상에서 UHS의 스펙트럴 가속도가 커 스펙트럼 형상계수가 1.0 이하가 되는 것을 알 수 있다.

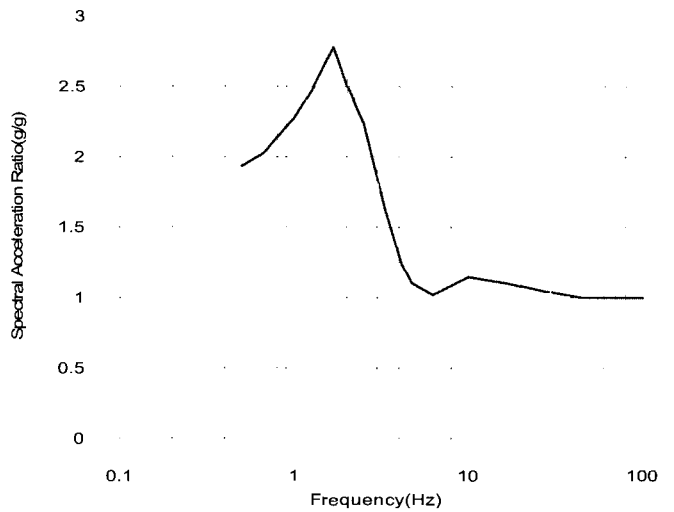


그림 2 설계스펙트럼과 부지고유 응답스펙트럼의 스펙트럴 가속도 비

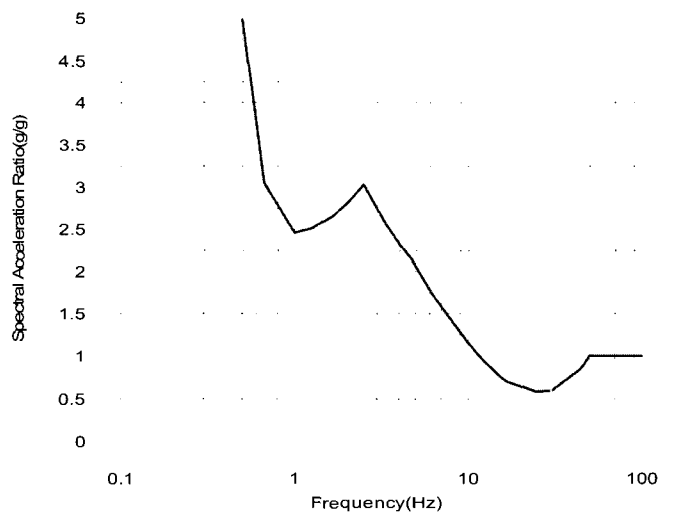


그림 3 설계스펙트럼과 UHS의 스펙트럴 가속도 비

평가용 응답스펙트럼의 변화에 따른 층응답스펙트럼의 변화를 평가하기 위해 본 연구에서는 대상구조물로 그림 4와 같은 서로 다른 고유진동수 특성을 갖는 원전 격납건물을 동시에 집중질량 모델로 모델링하여 사용하였다. 이들 구조물에 대한 고유치 해석결과는 표 2와 같으며 외벽의 고유진동수는 4.73Hz, 내부구조물의 고유진동수는 12.35Hz이다.⁽¹⁵⁾

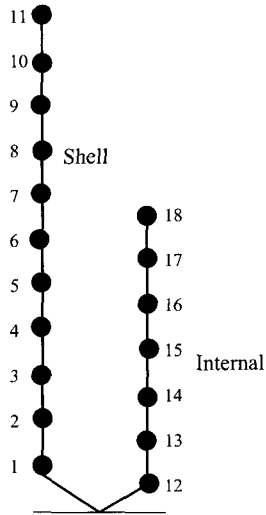


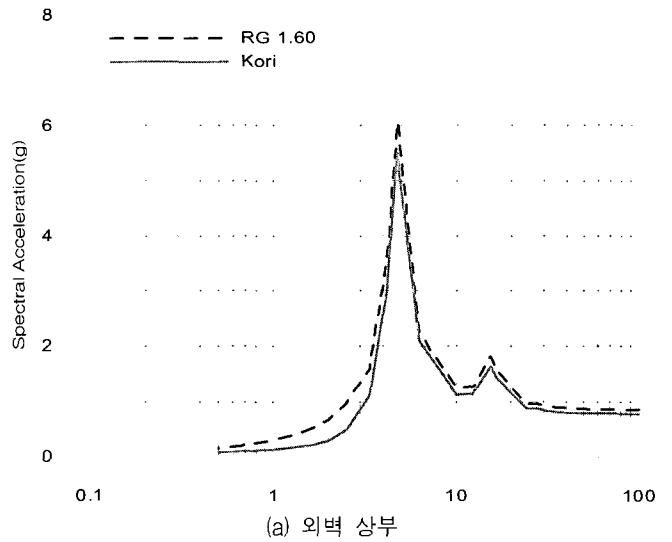
그림 4 집중질량 해석모델

표 2 해석모델의 동적특성

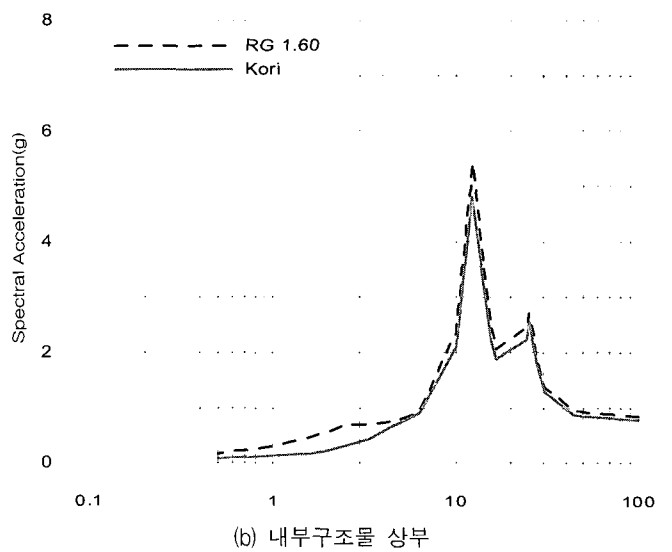
Mode No.	Natural Frequency(Hz)	Modal Participation Factor
1	4.73	-28.074
2	12.35	20.325
3	15.40	16.326
4	24.40	-10.843
5	26.86	1.036
6	27.80	-10.549
7	30.45	-8.084
8	44.31	5.585
9	45.93	-0.514
10	47.33	11.054

그림 5에 설계응답 스펙트럼인 US NRC R. G. 1.60의 표준응답 스펙트럼과 고리 부지고유 응답스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 5Hz 이상의 진동수 영역에서는 설계 응답스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼과 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. 그림 6에는 격납건물 외벽 및 내부구조물 상부에 대해 작성된 층응답스펙트럼의 스펙트럴 가속도 비를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 약 5Hz 이상의 진동수 영역에서는 외벽 및 내부구조물 모두에서 그림 2의 입력 스펙트럼의 스펙트럴 가속도 비와 유사한 값을 보여주고 있다. 따라서 기기의 내진성능 평가에 사용되는 층응답스펙트럼에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 또한 대부분의 원전 구조물의 고유진동수가 5Hz 이상이므로 스펙트럼 형상계수와 층응답스펙트럼 비는 유사한 값을 가지게 되므로 기존의 취약도 분석에서 가정된 구조물의 고유진동수에 따른 스펙트럼 형상계수를 이용한 분석이 동일한 결과를 주게되므로 고진동수 영역에서의 기기의 지진취약도는 유사한 결과를 주게됨을 알 수 있다.

고진동수 특성을 갖는 지진동이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기 위하여 기존 국내 원전 부지의 확률론



(a) 외벽 상부



(b) 내부구조물 상부

그림 5 부지고유 스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼

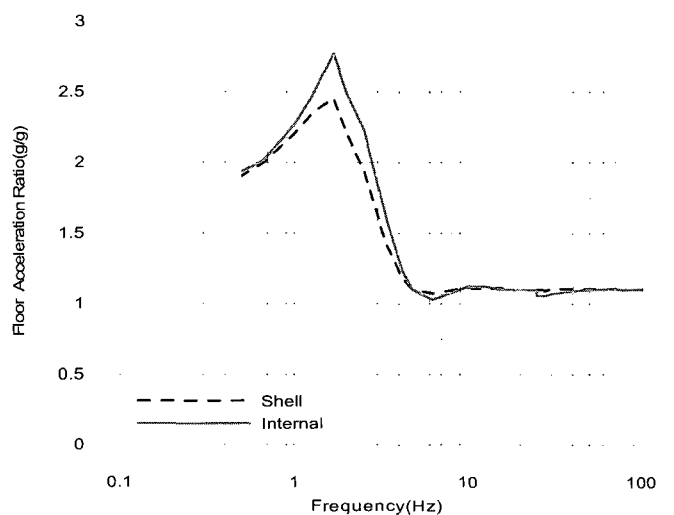


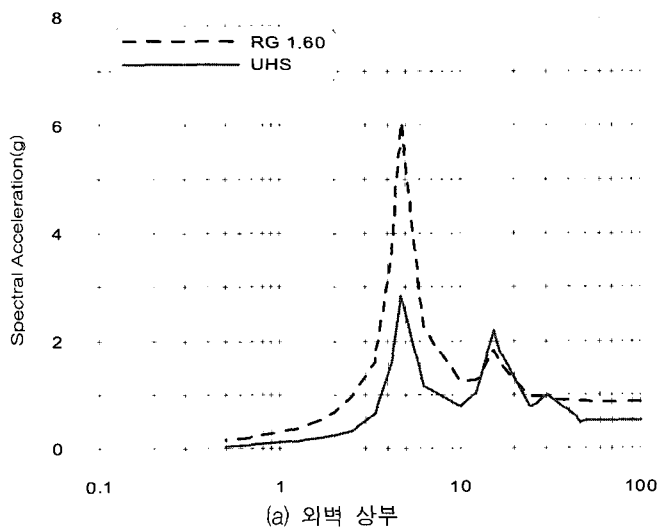
그림 6 부지고유 스펙트럼에 의한 외벽 및 내부구조물 상부에서의 층응답스펙트럼 비

적 지진재해도 결과를 이용하여 작성한 등재해도 스펙트럼을 이용하였다. 앞서 기술한 바와 같이 우리나라 및 미국 동부지역에서의 등재해도 스펙트럼은 고진동수 영역에서의 응

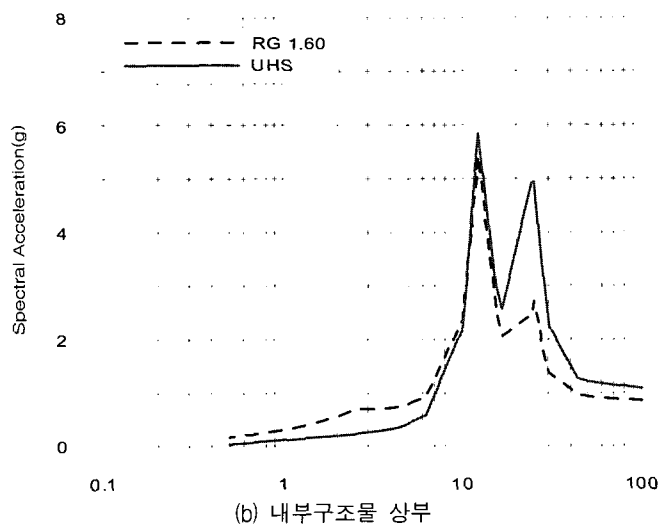
답이 매우 크게 나타나며 원전 주요 구조물의 고유진동수가 대부분 10Hz 이하이므로^{(2),(4)} 등재해도 스펙트럼에 의한 구조물의 손상확률은 크게 저하될 것으로 판단된다. 그러나 전기기 등 고진동수 지진동에 민감한 기기의 구조적 또는 기능적 파괴확률이 크게 증가될 가능성이 있다.

그림 7에 격납건물 외벽 및 내부구조물의 정점에서의 응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물 외벽에서는 등재해도 스펙트럼에 의한 응답이 대체적으로 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. 특히 24Hz에서는 등재해도 스펙트럼에 의한 응답스펙트럼의 가속도가 2배 이상 크게 나타났으며 40Hz 이상에서는 25% 이상 크게 나타났다.

그림 8에는 격납건물 외벽 및 내부구조물 상부에 대해 작성된 응답스펙트럼의 스펙트럴 가속도 비를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 외벽 상부에서는 그 비가 대체적으로 1.0 이상이 되나 내부구조물 상부에서는 10Hz 이상의 고진동수 구간에서 1.0 이하로 내려가는 것을 볼 수 있다.



(a) 외벽 상부



(b) 내부구조물 상부

그림 7 등재해도 스펙트럼에 의한 응답스펙트럼

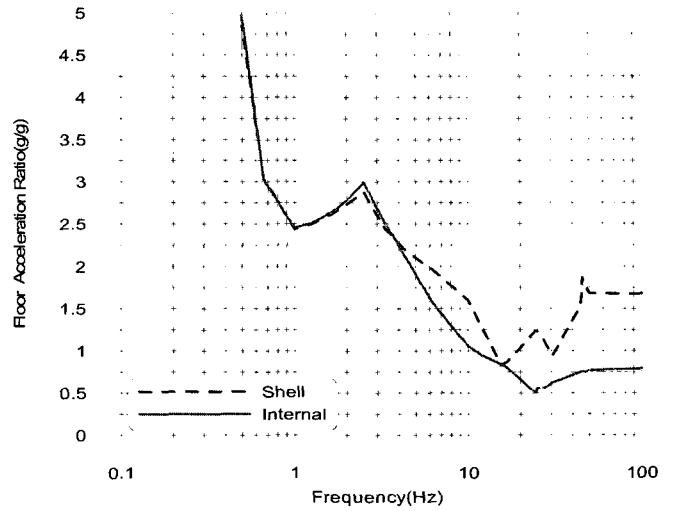


그림 8 UHS에 의한 외벽 및 내부구조물 상부에서의 응답스펙트럼 비

이는 설계 스펙트럼에 의한 응답스펙트럼 값이 UHS에 의한 스펙트럼 값에 비해 작아 구조물의 고유진동수에서의 비를 지진취약도에 그대로 고려할 경우 과대평가 될 수 있음을 보여주는 것이다.

이상의 결과로부터 단순히 응답스펙트럼에 미치는 영향만을 평가해 본다면 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 것으로 나타났다.

4.3 고진동수 지진동 영향 고려방안

앞서 기술한 바와 같이 설계스펙트럼과 평가용 기준 스펙트럼과의 차이에 따른 여유도를 구조물의 고유진동수에서의 스펙트럴 가속도 비로 나타낼 수 있는 스펙트럼 형상계수에 의해 고려하게 된다. 두 입력스펙트럼의 형상이 유사할 경우 응답스펙트럼은 구조물의 고유진동수에 의해 지배되며 고진동수의 영향이 크게 나타나지 않는다. 그러나 고진동수 성분이 큰 지진동의 경우에는 그 영향이 매우 커지게 되며, 또한 구조물의 고차모드에 따른 고진동수 영역에서의 증폭영향 역시 적절히 고려할 필요가 있다.⁽¹⁶⁾

본 연구에서의 고진동수 지진동 영향 평가에서 나타난 바와 같이 입력지진동에서의 고진동수 성분이 매우 클 경우 응답스펙트럼에 미치는 영향이 매우 크게 된다. 따라서 일반적으로 지진취약도 분석이나 내진여유도 평가에서 입력지진동의 형상이 크게 달라질 경우 새로이 응답스펙트럼을 작성하여 평가하는 것이 바람직하다.⁽¹⁷⁾ 특히 우리나라나 미국 동부지역과 같이 고진동수 지진동 성분이 우세한 지역에서는 고진동수 특성을 갖는 기기의 정확한 취약도해석을 위해서는 본 연구에서 제시한 응답 스펙트럼 계수의 고려가 필수적인 것으로 판단된다. 또한 구조물의 고유진동수에서의 스펙트럼 형상계수를 고려하는 것은 고진동수 지진동의 영향을 적절하게 고려하지 못하므로 스펙트럼 형상계수 대

신 응답스펙트럼 형상계수를 고려함으로써 고차진동 모드에 의한 영향도 적절히 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다.

5. 스펙트럼 형상 영향 평가 예

스펙트럼의 형상에 따른 원전 기기의 지진취약도의 평가 결과를 비교, 분석하기 위해 과거에 수행된 연구결과⁽¹⁵⁾ 및 본 연구의 결과를 이용하여 임의 고유진동수를 갖는 기기를 이용하여 스펙트럼 형상계수 및 응답스펙트럼 형상계수를 산정하여 이들이 지진취약도 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 고유진동수가 각각 15.4Hz 및 24.4 Hz인 기기의 취약도 해석 시 기존의 방법에서 사용하게 되는 스펙트럼 형상계수와 본 연구에서 제안하고 있는 응답스펙트럼 형상계수를 각각 산정하고 이를 비교하여 표 3에 나타내었다.

표에서 보는 바와 같이 이 두 기기의 지진취약도를 부지 고유 스펙트럼을 사용하여 평가할 경우 대체적으로 두 형상계수의 값이 유사하게 나타났다. 그러나 UHS와 같이 설계스펙트럼에 비해 저진동수 영역에서는 스펙트럼 가속도가 매우 작고 고진동수 영역에서는 큰 스펙트럼을 사용할 경우 최대 2.6배까지 과대평가 될 수 있음을 보여주고 있다. 이는 저진동수 영역에서의 스펙트럼 값이 설계스펙트럼에 비해 작아 큰 여유도를 가지고 있는 것으로 보이며 이를 지진취약도에서 스펙트럼 형상계수로 반영할 경우 이 여유도가 그대로 반영된다는 것이다. 그러나 실제 기기의 평가에 필요한 기기 고유진동수 구간에서의 응답스펙트럼은 오히려 UHS에 의한 응답스펙트럼 값이 설계스펙트럼에 의한 값에 비해 커지게 되므로 기기의 취약도가 과대평가되는 것이다.

이상의 결과로 미루어 볼 때 원전 구조물과 기기의 고유진동수가 존재하는 구간에서 설계스펙트럼과 평가용 스펙트럼의 형상에 큰 차이가 발생할 경우 구조물 고유진동수에서의 입력스펙트럼값의 비로 취급되는 스펙트럼 형상계수로 기기의 지진취약도를 평가하는 것보다는 응답스펙트럼을 다시 평가하여 응답스펙트럼 형상계수로 고려하는 것이 바람직하다. 본 연구에서 제시하는 방법을 이용하여 새로운 응답스펙트럼을 작성할 경우 기존의 구조물 고유진동수에서의 영향 뿐 아니라 고차모드의 영향도 고려할 수 있으며 기존의 연구결과⁽¹⁶⁾ 역시 포함할 수 있으므로 매우 합리적인 방법이라고 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 입력스펙트럼의 진동수 특성이 응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하고 이를 구조물 내부에 설치된 기기의 취약도 분석에 고려할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 고진동수 성분이 우세한 입력지진이 응답스펙트럼에 미치는 영향은 구조물의 기본 진동수에 따라 크게 차이가 나는 것으로 나타났다. 특히 구조물의 고유진동수가 클 경우 고진동수 입력에 의한 응답스펙트럼의 증폭이 매우 크게 나타났다.
- 임의 기기에 대한 스펙트럼 형상계수 및 응답 스펙트럼 형상계수를 평가한 결과 지진취약도가 2.6배까지 과대평가 될 수 있음을 알 수 있었다.
- 입력스펙트럼의 형상이 크게 달라질 경우 기기의 취약도 평가에서는 구조물의 고유진동수에서의 스펙트럼 형상계수 대신 기기의 응답관련 변수에서 응답스펙트럼 형상계수로 고려하는 것이 바람직하며 특히 고차진동 모드에 의한 응답 스펙트럼 영향을 적절히 반영할 수 있다.
- 입력 스펙트럼의 형상이 크게 차이가 날 경우에는 반드시 응답스펙트럼을 새로 작성하여 기기의 내진성능을 평가하는 것이 바람직하며, 응답스펙트럼 작성에는 기존의 내진해석 결과를 활용할 수 있는 직접 응답스펙트럼 작성법을 사용하는 것이 시간과 노력을 크게 줄일 수 있다.
- 우리나라 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도 해석 결과 우리나라의 지진 특성이 저진동수 성분이 작고 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.

표 3 기기 취약도 평가 시의 스펙트럼 형상계수 및 응답스펙트럼 형상계수

	Location	Evaluation Spectrum	Ground Spectrum Shape Factor (a)	FRS Shape Factor (b)	Ratio (a/b)
Equipment 1 (15.4Hz)	Shell	Kori	1.11	1.11	1.00
		UHS	2.13	0.82	2.60
	Internal	Kori	1.13	1.10	1.03
		UHS	0.90	0.84	1.07
Equipment 2 (24.4Hz)	Shell	Kori	1.11	1.10	1.00
		UHS	2.13	1.23	1.73
	Internal	Kori	1.125	1.10	1.03
		UHS	0.9	0.49	1.84

참고 문헌

1. US NRC Regulatory Guide 1.60, *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, 1973.
2. Reed, J. W., Kennedy, R. P., and Lashkari, B., "Analysis of High-Frequency Seismic Effects," EPRI TR-102470, 1993.
3. McGuire, R. K., Silva, W. J., and Costantino, C. J., "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. Kennedy, R. P. and Ravindra, M. K., "Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 79, 1984, pp. 47-68.
6. Reed, J. W. and Kennedy, R. P., *Methodology for Developing Seismic Fragilities*, EPRI TR-103959, 1994.
7. Newmark, N. M. and Hall, W. J., "Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants," NUREG/CR-0098, 1978.
8. Llambias, J. M., "The Use of the Uniform Risk Spectra in the Seismic PSA for a PWR Power Station," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 154, 1995.
9. Choi, I. K., Choun, Y. S., Seo, J. M., and Yun, K. H., "Reevaluation of Seismic Fragility Parameters of Nuclear Power Plant Components Considering Uniform Hazard Spectrum," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 34, No. 6, 2002.
10. 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.
11. Singh, M. P., "Generation of Seismic Floor Spectra," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 101, No. EM5, 1975.
12. Singh, M. P. and Sharma, A. M., "Seismic Floor Spectra by Mode Acceleration Approach," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 111, No. 11, 1985.
13. Singh, M. P., "Seismic Design Input for Secondary Systems," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 106, No. ST2, 1980.
14. Chang, S. P., Seo, J. M., Kim, J., and Lee, J. R., "Effects of PSDF Forms on Floor Response Spectra Generation in Direct Solution Method," *Transaction of SMiRT 11*, Vol. K, K10/3, 1991.
15. 최인길, 서정문, 전영선, "입력스펙트럼 형상이 층응답스펙트럼에 미치는 영향 평가", 2002 추계 한국원자력학회 학술발표회 논문집, 2002.
16. 조양희, 조성국, "모드기여도를 고려한 복수모드구조물의 지진취약도분석", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제4호, 2002, pp. 15-22.
17. Reed, J. W., Kennedy, R. P., Buttemer, D. R., Idriss, I. M., Moore, D. P., Barr, T., Wooten, K. D., and Smith, J. E., "A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin(Revision 1)," EPRI NP-6041-SL, 1991.