

## 고진동수 지진동에 대한 원전 기기의 지진취약도 분석 Seismic Fragility Analysis of NPP Components for High Frequency Ground Motions

최인길\*                      서정문\*\*                      진영선\*\*  
Choi, In-Kil                Seo, Jeong-Moon            Choun, Young-Sun

---

### 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.

---

### 1. 서론

원전 구조물의 내진안전성 평가를 위해 지금까지 SPRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment) 또는 SMA(Seismic Margin Analysis)를 수행하여 왔다. 이는 설계시의 보수적인 설계로 인한 안전율을 현실적으로 평가하여 실제 원전 구조물 및 기기가 가지는 객관적인 안전성을 확률론적으로 평가하는 데 그 바탕을 두고 있다.

SPRA나 SMA에서는 평가에 필요한 기준지진으로 응답스펙트럼이 사용된다. 우리나라 원전 구조물 및 기기의 내진설계에서는 US NRC R.G. 1.60[1]에서 제시하고 있는 표준응답스펙트럼을 사용하여 왔으나 이 표준응답스펙트럼은 강지진대에 속하는 미국 서부에서 발생한 강진기록을 이용하여 작성한 것으로 미국 동부지역이나 우리나라의 지반응답 스펙트럼에 비해 저진동수 영역에서는 매우 낮은 값을 보이고 있으며 고진동수 영역에서는 큰 값을 보여주고 있다[2,3,4].

우리나라에서 발생한 지진기록의 분석 및 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석 결과 기존의 설계스펙트럼에 비해 고진동수 영역에서 매우 큰 값을 보여주고 있다. 이를 위해 미국 EPRI에서는 고진동수 지진파의 영향에 대한 평가를 수행한 바 있으며, 이 연구를 통하여 기기의 용접부의 비선형 거동을 고려하여 유효진동수 및 유효감쇠비에 따른 입력스펙트럼의 수정법을 제시한

---

\* 정회원, 한국원자력연구소 선임연구원

\*\* 정회원, 한국원자력연구소 책임연구원

바 있다[2]. 이 연구에서는 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, 기기의 구조적 또는 기능적 파괴모드에 대한 내진성능 평가를 위해서는 이러한 기준 스펙트럼을 이용하여 층응답스펙트럼을 다시 작성하여야 한다.

본 연구에서는 기존의 원전 기기에 대한 지진취약도 평가방법을 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 (Safe Shutdown Earthquake) 수준을 초과하는 메디안 지반가속도 내력(Median Seismic Capacity)은 기기의 성능 및 응답관련 변수 뿐 아니라 구조물의 응답관련 변수를 포함하는 일련의 안전계수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$A_m = F \cdot A_{SSE} \quad (1)$$

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

$$F = F_{EC} \cdot F_{RS} \cdot F_{ES} \quad (2)$$

여기서,  $F_{EC}$ 는 기기의 성능계수이며 여기에는 기기의 강도 및 비탄성에너지 흡수계수가 포함된다.  $F_{RS}$ 는 구조물의 응답계수를 나타내며 구조물의 취약도 계산에 사용한 값과는 차이가 있다. 또한  $F_{ES}$ 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 불확실성 및 랜덤성에 대한 대수표준편차는 이들 각각의 계수에 대한 대수표준편차를 다음 식과 같이 SRSS (Square Root of the Sum of the Squares)로 구한다.

$$\beta_R = [\sum(\beta_{r,i})^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$\beta_U = [\sum(\beta_{u,i})^2]^{1/2} \quad (4)$$

여기서,  $i$ 는 성능 및 응답관련 계수를 나타내며  $\beta_r$  및  $\beta_u$ 는 이들 계수 각각의 랜덤성 및 불확실성에 대한 대수표준편차를 나타낸다.

표 1. 구조물 및 기기의 지진취약도 평가에 고려하는 변수[6]

Structure	Capacity	Strength (Yield or Ultimate) Inelastic Energy Absorption
	Response	<u>Ground Response Spectra</u> 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)	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

### 3. 입력 스펙트럼의 보수성 평가

SPRA에서는 지반운동 변수에 고정된 평활화한 응답스펙트럼을 이용하여 두 수평방향의 입력지진을 선정한다. 부지에 대한 지진정보가 충분할 경우에는 부지 고유의 스펙트럼을 사용하거나 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum)을 사용하는 것이 바람직하다. 이 경우 지반운동 변수의 변동성에 대한 불확실성  $\beta_u$ 가 작아지게 된다. 그러나 부지에서의 지진정보가 충분하지 않거나 적절히 평가되어 있지 않은 경우에는 NUREG/CR-0098[7] 메디안 스펙트럼 등을 사용하는 것이 일반적이다. 설계지진으로 사용된 표준응답스펙트럼의 경우 메디안 스펙트럼이 아닌 84% 초과 확률 수준의 스펙트럼으로 정의되어 있다. 따라서 설계 스펙트럼과 메디안 스펙트럼 사이에는 어느 정도의 여유도를 가지고 있다. 설계 시 사용된 입력 스펙트럼의 보수성을 평가하기 위해 스펙

트럼 형상계수가 사용된다. 스펙트럼 형상계수는 부지 고유의 응답스펙트럼 또는 등재해도 스펙트럼으로 정의된 메디안 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 메디안 스펙트럼의 스펙트럴 가속도를 나타낸다. 이때 각각의 감쇠값은 동일한 값을 사용하며  $F_{SS}$ 는 구조물 고유진동수의 함수가 된다[6].

지금까지 원전 기기에 대한 지진취약도 분석에서는 설계응답스펙트럼과 평가용 기준스펙트럼의 형상 차이를 구조물의 스펙트럼 형상계수에 적용하여 사용하여 왔으며, 스펙트럼 형상의 변화에 따른 층응답스펙트럼의 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].

#### 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 층응답스펙트럼을 이용하여 평가한다. 기기의 응답관련 변수는 기기의 검증방법에 따라 표 1에서 제시한 변수들을 적절히 고려하여 평가하게 된다. 기기의 취약도 평가에서 구조물의 응답관련 변수 중 기준 지진동과 설계기준 지진동의 두 스펙트럼 형상의 차이는 스펙트럼 형상계수로 고려한다. 그러나 두 스펙트럼의 형상이 크게 달라 층응답스펙트럼에서의 형상이 크게 변화할 경우에도 스펙트럼 형상계수만을 이용하여 평가하는 것이 일반적이며 달라진 스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼의 변화는 별도로 고려하지 않고 있다. 본 연구에서는 고진동수 지진동이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기 위해 입력지진동의 형상이 크게 달라질 경우의 층응답스펙트럼의 변화를 다양한 입력지진동 스펙트럼을 이용하여 평가하였다.

##### 4.1 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 내진 성능 평가 측면에서 불합리하다고 볼 수도 있다. 또한 이 방법은 층응답스펙트럼의 산정에 많은 시간과 노력이 요구된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 설계 응답스펙트럼으로부터 직접 층응답스펙트럼을 구하기 위한 연구가 수행되기 시작하였으며, 최초로 Biggs[10]에 의해 개발되었다. 이후 많은 연구자들에 의해 다양한 방법이 개발되었다. 본 연구에서는 고진동수 특성을 갖는 지진동이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기 위해 기 개발된 방법 중 Singh[11-14]에 의해 개발된 방법을 이용하여 직접 층응답스펙트럼을 작성하였다.

#### 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 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum)에 의한 층응답스펙트럼의 변화 양상을 평가하였다. 해석에 사용된 입력 응답스펙트럼을 그림 1에 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 설계스펙트럼과 부지고유 스펙트럼의 경우 고진동수 영역에서 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.

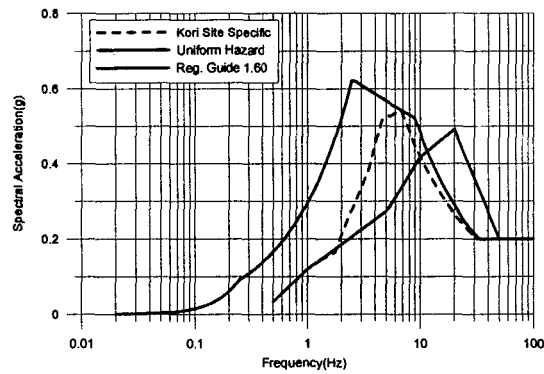


그림 1. 입력 응답스펙트럼 비교

기준응답스펙트럼의 변화에 따른 층응답스펙트럼의 변화를 평가하기 위해 본 연구에서는 대상 구조물로 그림 2와 같은 전형적인 원전 격납건물의 외부 셸 및 격납건물 내부 구조물을 집중질량 모델로 모델링 한 해석모델을 사용하였다. 또한 격납건물의 고유치 해석결과는 표 2와 같다[15].

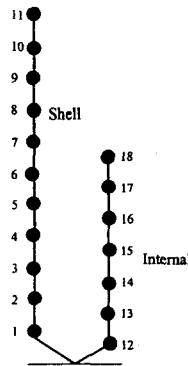


표 2. 해석모델의 동적특성

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 2. 격납건물 집중질량 해석모델

그림 3에 설계응답 스펙트럼인 US NRC Regulatory Guide 1.60[1]의 표준응답 스펙트럼과 고리 부지고유 응답스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 5Hz 이상

의 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 총응답스펙트럼에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단할 수 있으며, 고진동수 영역에서의 기기 취약도는 유사하게 나타나게 됨을 알 수 있다.

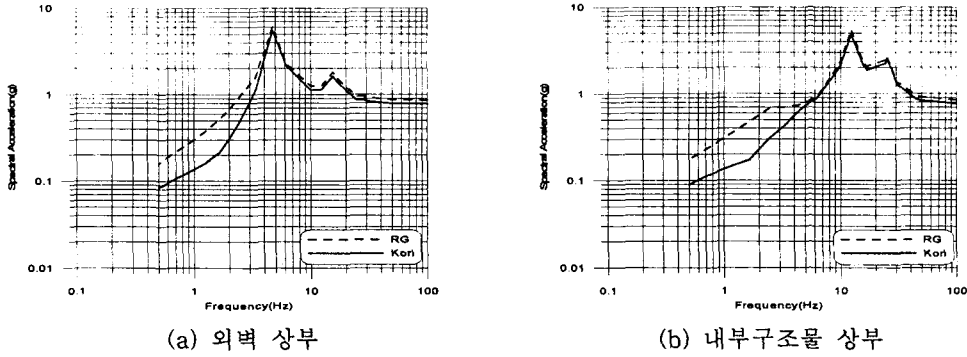


그림 3. 부지고유 스펙트럼에 의한 총응답스펙트럼

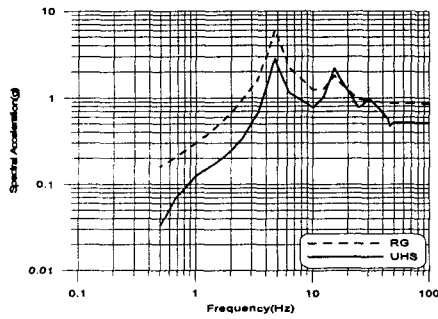
고진동수 특성을 갖는 지진동이 총응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기 위하여 기존 국내 원전 부지의 확률론적 지진재해도 결과를 이용하여 작성한 등재해도 스펙트럼을 이용하였다. 앞서 기술한 바와 같이 우리나라 및 미국 동부지역에서의 등재해도 스펙트럼은 고진동수 영역에서의 응답이 매우 크게 나타나며 원전 주요 구조물의 고유진동수가 대부분 10Hz 이하이므로[2,4] 등재해도 스펙트럼에 의한 구조물의 손상확률은 크게 저하될 것으로 판단된다. 그러나 전기기기 등 고진동수 지진동에 민감한 기기의 구조적 또는 기능적 파괴확률이 크게 증가될 가능성이 있다.

그림 4에 격납건물 외벽 및 내부구조물의 정점에서의 총응답스펙트럼을 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 총응답스펙트럼의 가속도가 2배 이상 크게 나타났으며 40Hz 이상에서는 25% 이상 크게 나타났다.

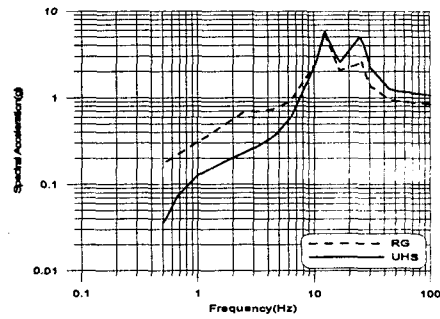
이상의 결과로 미루어 보아 구조물의 고유진동수가 낮을 경우 고진동수 성분에 의한 고진동수 특성을 갖는 지진동의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 구조물의 고유진동수가 큰 구조물에서는 고진동수 특성이 총응답스펙트럼에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

#### 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 총응답스펙트럼은 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 있으며 이에 대한 연구도 일부 수행된 바 있다[16].



(a) 외벽 상부



(b) 내부구조물 상부

그림 4. 등재해도 스펙트럼에 의한 층응답스펙트럼

본 연구에서의 고진동수 지진동 영향 평가에서 나타난 바와 같이 입력지진동에서의 고진동수 성분이 매우 클 경우 층응답스펙트럼에 미치는 영향이 매우 크게 된다. 따라서 일반적으로 지진취약도 분석이나 내진여유도 평가에서 입력지진동의 형상이 크게 달라질 경우 새로이 층응답스펙트럼을 작성하여 평가하는 것이 바람직하다[17]. 또한 구조물의 고유진동수에서의 스펙트럼 형상계수를 고려하는 것은 고진동수 지진동의 영향을 적절하게 고려하지 못하므로 스펙트럼 형상계수 대신 층응답스펙트럼 형상계수로 고려하는 것이 바람직하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 입력스펙트럼의 진동수 특성이 층응답스펙트럼에 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 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.
- 입력스펙트럼의 형상이 크게 달라질 경우 기기의 취약도 평가에서는 구조물의 고유진동수에서의 스펙트럼 형상계수 대신 기기의 응답관련 변수에서 층응답스펙트럼 형상계수로 고려하는 것이 바람직하다.
- 입력 스펙트럼의 형상이 크게 차이가 날 경우에는 반드시 층응답스펙트럼을 새로 작성하여 기기의 내진성능을 평가하는 것이 바람직하며, 층응답스펙트럼 작성에는 기존의 내진해석 결과를 활용할 수 있는 직접 층응답스펙트럼 작성법을 사용하는 것이 시간과 노력을 크게 줄일 수 있다.
- 우리나라 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도 해석 결과 우리나라의 지진 특성이 고진동수 성분이 매우 우세한 것으로 밝혀지고 있어 추후 구조물 및 기기의 내진성능 평가 시에는 이러한 고진동수 지진동 특성이 전기기와 같이 고진동수 성분에 민감한 기기의 구조적, 기능적 파괴에 미치는 영향을 반드시 고려하여 평가하여야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 증장기연구개발 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. R. P. Kennedy and M. K. Ravindra, “Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies,” Nuclear Engineering and Design, 79, pp.47-68, 1984.
6. John W. Reed and Robert P. Kennedy, 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. John M. Llambias, “The Use of the Uniform Risk Spectra in the Seismic PSA for a PWR Power Station,” Nuclear Engineering and Design, 154, 1995.
9. In-Kil Choi, Young-Sun Choun, Jeong-Moon Seo, and Kwan-Hee Yun, “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. M. P. Singh, “Generation of Seismic Floor Spectra,” Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 101, No. EM5, 1975.
12. M. P. Singh, and A. M. Sharma, “Seismic Floor Spectra by Mode Acceleration Approach,” Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 111, No. 11, 1985.
13. M. P. Singh, “Seismic Design Input for Secondary Systems,” Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST2, 1980.
14. 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.
15. 최인길, 서정문, 전영선, “입력스펙트럼 형상이 층응답스펙트럼에 미치는 영향 평가,” 2002 추계 한국원자력학회 학술발표회 논문집, 2002.15. 원자력학회 논문
16. 조양희, 조성국, “모드기여도를 고려한 복수모드구조물의 지진취약도분석,” 한국지진공학회 논문집, 제 6권, 제 4호, 2002.
17. 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.