

## 평가용 스펙트럼이 구조물의 지진리스크에 미치는 영향

### Effect of Evaluation Response Spectrum on the Seismic Risk of Structure

김민규<sup>1)</sup> · 최인길<sup>2)</sup>

Kim, Min-Kyu · Choi, In-Kil

**국문 요약** >> 구조물의 지진취약도 분석을 위해서는 평가용 지반응답스펙트럼의 선택이 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 기존의 설계응답스펙트럼을 이용하여 평가된 전력설비에 대하여 등재해도 스펙트럼을 이용하여 취약도 변수를 치환하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 이용하여 기존의 전력설비를 대상으로 도출된 고신뢰도저파손확률값(HCLPF)을 비교하였으며, 최종적으로 지진재해도 곡선을 이용하여 전력설비에 대한 정량적 지진위험도를 도출하였다. 결과적으로 설계응답스펙트럼을 이용한 지진위험도 평가는 전력설비의 지진위험도를 보수적으로 판단할 수 있는 것으로 평가되었다.

**주요어** 지진취약도 분석, 평가용 지반응답스펙트럼, 등재해도 스펙트럼, 고신뢰도저파손 확률, 지진위험도

**ABSTRACT** >> The selection of an evaluation response spectrum can have a significant effect on the seismic fragility evaluation of a structure. A method for modifying the seismic fragility parameters that are calculated based on the design spectrum is described in this study. The modification factor is used to modify the original fragility parameters. The HCLPF (High Confidence of Low Probability of Failure) acceleration levels of the electric system using previous design spectrum and uniform hazard spectrum (UHS) were compared. Finally, seismic risk analyses were performed according to a uniform hazard spectrum. From the results, it was concluded that based on the design spectrum, seismic risk for the electric system might be underestimated.

**Key words** Seismic fragility, Evaluation response spectrum, Uniform hazard spectrum, HCLPF (High Confidence of Low Probability of Failure), Seismic risk

## 1. 서론

구조물의 지진에 대한 안전성을 판단하기 위한 방법으로 기존에는 발생가능한 지진하중을 이용하여 해당 구조물에 대한 지진응답해석을 통하여 결정론적으로 부재의 손상등을 판단할 수 있는 방법을 사용하였다. 그러나 지진과 같이 불확실성이 큰 사건의 경우는 지진에 의한 안전성을 판단하기 위해서는 확률론적인 방법의 사용이 점차 증가하고 있다. 확률론적인 방법을 이용하여 구조물의 안전성을 판단하기 위한 방법으로 지진취약도와 지진재해도 곡선을 이용하여 지진리스크를 산출하면, 평가하고자 하는 구조물의 연간 손상확률을 구할 수 있게 된다. 이러한 방법을 확률론적 지진

안전성 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment, SPRA)라고 한다. 확률론적 지진안전성 평가방법을 이용하여 구조물의 지진리스크를 산출하는데 있어서 가장 핵심이 되는 것은 지진취약도의 산정방법과 해당 구조물이 위치하고 있는 부지에 대한 가장 적절한 지진재해도 곡선을 선정하는 것이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 지진취약도 평가를 위한 지반응답스펙트럼이 지진리스크에 얼마나 큰 영향을 미치는가를 평가하는 연구를 수행하였다.

지진취약도 평가가 수행된 것은 그리 오래되지 않은 일로서 원자력 발전소의 안전도를 평가하기 위하여 처음 시도하였으며 Kennedy and Ravindra<sup>(1)</sup>에 의해서 시작이 되어 정립되었다고 할 수 있다. 최근 들어 그 적용대상 구조물의 범위를 일반 구조물로 넓혀서 일반구조물의 지진안전성을 판단하는 데에도 지진취약도를 이용한 평가방법이 적용되고 있는 실정이다. 이러한 지진취약도 평가를 수행함에 있어서 지진파의 랜덤성을 반영하기 위하여 기존에 발생되었던 여러 지진들을 이용한 지진응답해석을 수행하거나 설계지진

<sup>1)</sup> 정희원·한국원자력연구원 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사  
(교신처: minkyu@kaeri.re.kr)

<sup>2)</sup> 정희원·한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 7. 8 / 수정일 1차 : 2009. 10. 21, 2차 : 10. 31/  
게재확정일 : 2009. 11. 2)

응답스펙트럼을 기준으로 하여 그에 부합하는 다수의 인공 지진파를 생성하여 지진응답해석을 수행하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 해당 부지에서 발생하지 않은 지진파를 사용하는 것과 또한 설계지진을 사용하는 방법 모두 많은 불확실성을 포함하고 있는 것이라고 할 수 있다. 원자력발전소의 경우 좀 더 발전된 방법으로 원전부지의 부지고유 응답스펙트럼을 작성하여 지진취약도 평가시 사용하고 있지만, 이 또한 전체 주파수 영역에서 동일한 초과확률을 가지고 있는 것은 아니므로 적절한 사용이라고는 할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 기존의 방법으로 구해진 전력시설물에 대한 지진취약도 결과를 등재해도 스펙트럼에 의한 결과로 변환하여 취약도 변수를 산정하고 HCLPF(High Confidence and Low Probability of Failure, 고신뢰도 저파손 확률)값을 구하여 비교하였으며, 최종적으로 해당부지의 지진재해도 곡선과 지진취약도 결과를 조합하여 지반응답스펙트럼의 변화에 따른 구조물 및 주요 기기의 지진리스크를 비교하였다. 검토 결과 평가용 지반응답스펙트럼에 따라서 HCLPF의 차이가 크게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 설계 응답스펙트럼에 기준한 평가가 많은 보수성을 내재하고 있음을 알 수 있었다.

## 2. 지진리스크 평가

지진위험도(Seismic Risk)는 일정기간동안 지진으로 인하여 발생하는 일련의 손상 또는 손실 및 이러한 사건이 발생할 수 있는 초과확률로서 정의된다. 정량적인 지진위험도 평가는 최대지반가속도인 PGA로 표현되는 지진재해도와 지진취약도 곡선을 이용하여 수행할 수 있으며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.<sup>(2)</sup>

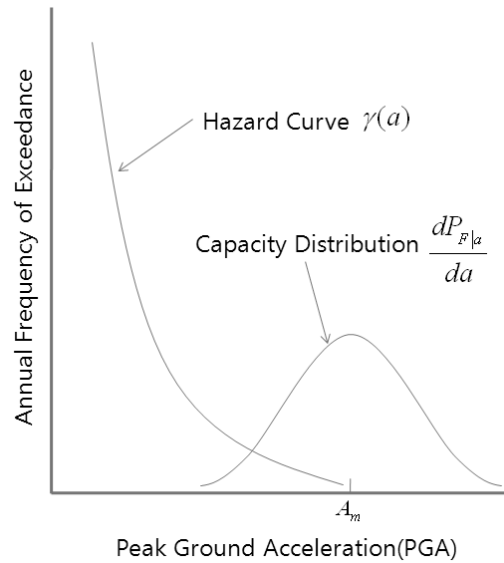
$$P_F \approx \int_0^{\infty} \gamma(a) \frac{dP_{F|a}}{da} da \quad (1)$$

여기서,  $P_F$ 는 손상확률이며,  $\gamma(a)$ 는 최대지반가속도( $a$ )에 대한 연초과확률을 의미하는 재해도 곡선을 나타내며,  $P_{F|a}$ 는 주어진 최대지반가속도에서의 파괴확률 즉 지진취약도를 의미한다. 지진재해도 곡선과 지진취약도 곡선이 그림 1과 같이 주어진 경우 식 (1)을 사용하여 정량적으로 지진위험도를 산정할 수 있다.

## 3. 지진리스크 평가용 지반응답스펙트럼 분석

### 3.1 교량구조물

원자력시설물을 제외하고는 국내외적으로 지진취약도 분



〈그림 1〉 지진위험도의 산정<sup>(2)</sup>

석을 가장 많이 수행하고 있는 구조물로 교량구조물을 들 수 있다. 방재연구소의 교량구조물에 대한 지진취약도함수 개발 연구에서는 국내 교량구조물에 대한 대표 지진취약도 함수를 도출하기 위하여 기존에 국외에서 발생한 El Centro, Taft 등 10개의 지진기록을 선정하여 국내 내진설계기준의 설계스펙트럼과 유사한 응답을 가지도록 주파수 성분과 가속도 크기를 변형하여 적용하였다.<sup>(3)</sup> 김상훈<sup>(4),(5)</sup>의 연구에서는 교량의 지진취약도 평가를 위하여 평가대상 교량이 위치하고 있는 LA 지역에서 과거의 지진기록을 이용하여 재현주기별로 지진기록을 생성하여 지진취약도 평가에 사용하고 있다.

### 3.2 건축구조물

국내에서는 건축물에 대한 지진취약도 평가가 널리 이루어지지 않았지만 최근 방재연구소에서는 국내 사회기반시설을 대상으로 한 지진취약도 함수를 도출하는 일련의 연구를 수행하였다. 위 연구의 일환으로 2007년에는 저층구조물의 지진취약도함수 도출기법 비교 검토라는 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 저층 콘크리트 구조물을 형태별로 분류하여 지진취약도 평가를 수행하였다. 지진취약도 평가를 위한 입력지진으로는 해외에서 발생하였던 주요 지진기록 18개를 선택하여 최대지반가속도에 따라 17단계로 구분하여 인공지진을 생성하여 지진취약도 분석을 수행하였다.<sup>(6)</sup> 국내에 마땅한 지진기록이 없으므로 불가피한 선택이었을 것으로 판단된다.

반면 Ellingwood 등<sup>(7)</sup>은 미국 중부지역의 건물에 대한 지진취약도 분석 연구에서 해당 지역에서의 강진기록이 적

기 때문에 지진원모델(Source Model)과 감쇠모델(Attenuation Model)을 이용하여 등재해도 지반운동을 생성하여 지진취약도 분석을 수행하였다.

### 3.3 전력시설물

전력시설물은 최근 발생한 지진에서 큰 피해를 입은 시설로서 그 때문에 지진취약도 평가 연구가 비교적 많이 수행된 분야이다. 국내의 경우 지진위험도 평가에 대한 연구는 일부 수행되었으나 본격적인 지진취약도 평가 연구는 국립방재연구소에서 2008년에 수행한 바 있으며 이때 지진취약도 평가를 위한 입력지진으로 전력시설물의 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼을 기준으로 한 인공지진가속도 시간이력을 이용하였다.<sup>(8)</sup>

외국의 경우는 이와 관련한 많은 연구가 수행되었는데 Ang et al.<sup>(9)</sup>은 변전시설에 대한 지진취약도 평가를 위하여 1989년 Loma Prieta 지진기록을 이용한 인공지진파를 이용하였다. Camensig et al.<sup>(10)</sup>은 고전압 변전소에 대한 지진위험도 평가연구에서 US NRC의 Reg. Guide 1.60<sup>(11)</sup>에서 제시하고 있는 스펙트럼과 해당 부지에서의 재현주기를 고려한 부지고유 응답스펙트럼을 사용하여 지진취약도 평가를 수행하였다. 다만 해당 지역이 이탈리아이므로 Reg. Guide 1.60의 설계응답스펙트럼에 적절한 계수를 이용하여 조절하여 사용하였다. Hwang and Huo<sup>(12)</sup>의 연구에서는 변전소의 변압기와 기타 구조물들을 대상으로 한 지진취약도 평가를 수행하면서 대상 부지의 지질조건 뿐 아니라 지반조건을 고려한 인공지진 응답스펙트럼을 작성하고 이를 이용한 취약도 평가를 수행하였다.

### 3.4 원자력시설물

원자력시설물에 대한 지진취약도 평가를 위해서는 많은 나라가 원전부지에 대한 부지고유 응답스펙트럼을 작성하여 그것을 이용한 평가를 수행한다. 국내의 경우 원자력발전소의 설계는 US NRC의 Reg. Guide 1.60에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼을 사용하고 있으며, 지진취약도 평가를 위해서는 고리원자력발전소를 기준으로 작성한 부지고유 응답스펙트럼을 사용하고 있다.<sup>(13)</sup>

### 3.5 평가용 응답스펙트럼 사용 비교

정리한 바와 같이 국내 대부분의 경우 지진위험도 평가를 위한 입력지진으로 표준설계응답스펙트럼을 이용한 인공지진파를 사용하거나 기준에 외국에서 발생하였던 여러개의

강진기록을 사용하고 있다. 원자력시설물의 경우 부지고유 응답스펙트럼을 사용하여 취약도 평가를 수행하고 있으나, 원자력시설에서 사용하는 부지고유 응답스펙트럼은 고리원자력발전소를 대상으로 하여 개발된 것으로 타 원전의 경우는 부지고유 응답스펙트럼이 없으므로 고리원전의 부지고유 응답스펙트럼을 이용한 평가를 수행하고 있다. 반면 외국의 경우는 취약도 평가를 위한 구조물의 부지에서 부지고유 응답스펙트럼을 작성하여 취약도 평가를 수행하고 있다. 국내에서 지진위험도 평가시 표준설계응답스펙트럼을 이용하는 것은 기존의 강진기록이 거의 전무하고 부지고유 응답스펙트럼을 이용한 방법이 아직 일반화 되어 있지 않기 때문에 불가피한 측면이 있지만 표준설계응답스펙트럼을 사용한 취약도 평가는 표준설계응답스펙트럼이 많은 보수성을 보유하고 있는 것을 감안하면 취약도 평가 결과 자체가 보수적으로 도출될 수 밖에 없는 한계를 가지고 있다고 할 수 있겠다.

## 4. 지진취약도 평가방법

### 4.1 지진취약도 평가

지진취약도 평가를 위해서는 구조물의 내력과 설계응답과의 관계로 정의되는 안전계수를 사용하여 구해지는 실제 내진성능을 구하게 된다. 안전계수는 설계단계에서 구조물의 내력과 응답간의 보수성을 대변하게 된다. 원자력발전소 기기의 지진내력의 중앙값은 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$A_m = F \cdot A_{SSE} \quad (2)$$

여기서,  $A_m$ 과  $A_{SSE}$ 는 각각 지반운동의 중앙값과 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake) 값이며  $F$ 는 안전계수이다. 구조물의 경우 안전계수  $F$ 는 구조내력계수와 구조응답계수의 두 가지로 구분된다. 기기의 경우는 기기내력계수, 구조응답계수 그리고 기기응답계수로 구분된다.

확률론적 지진안전성 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment, SPRA)에서 구조물과 기기의 실제 지진내력은 취약도 곡선 또는 HCLPF (High Confidence and Low Probability of Failure, 고신뢰도 저파손확률) 로 표현된다. SPRA에서의 HCLPF는 95% 신뢰도에서 5% 파괴확률 값으로 계산할 수 있으며, 구조물과 기기의 내진성능을 대표하는 값으로 사용된다. HCLPF값은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$HCLPF = A_m \cdot \exp[-1.65(\beta_R + \beta_U)] \quad (3)$$

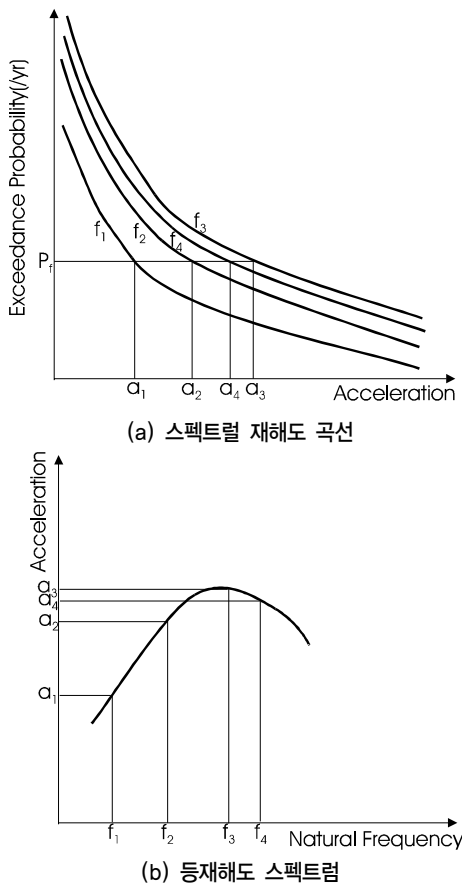
여기서,  $\beta_R$ 과  $\beta_U$ 는 랜덤성과 불확실성을 나타내는 대수 표준편차이다.

### 4.2 등재해도 스펙트럼

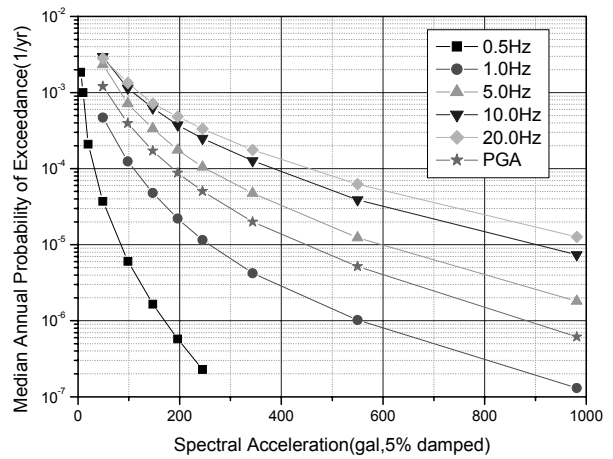
#### 4.2.1 등재해도 스펙트럼의 도출

확률론적 지진재해도 분석연구의 목적은 주어진 부지에서 지진의 크기별로 연초과확률을 산정하고 이러한 지진에서의 응답스펙트럼을 정의하는 것이다. 원자력발전소 부지에서의 지진재해도는 일반적으로 최대지반가속도(PGA)에 따른 연초과확률로 정의되는 일련의 지진재해도 곡선으로 표현할 수 있다.

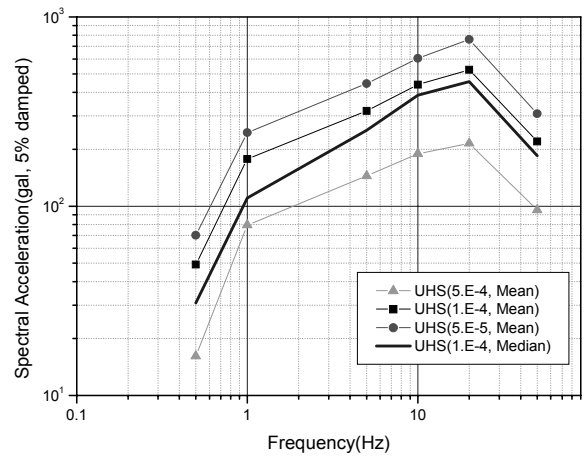
등재해도 스펙트럼의 계산은 확률론적 지진재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)과 유사한 과정을 거친다. PSHA가 최대지반가속도에 대응하는 초과확률을 계산하는 반면 등재해도 스펙트럼은 각 고유주파수( $f_N$ )에 따른 지반 응답 가속도의 초과확률을 계산하여 스펙트럴 지진재해도 곡선을 만들고 여기서 기준 확률값에 대응하는 가속도의 값을 각각 진동수의 기준재해도 곡선에서 읽는 방식으로 구하게 된다. 지진재해도 곡선으로부터 등재해도 스펙트럼을 도출하는 과정의 모식도를 그림 2에 도시하였다.<sup>(14),(15)</sup>



〈그림 2〉 등재해도 스펙트럼을 구하는 방법



〈그림 3〉 Example Spectral Hazard Curves for Korean NPP Site



〈그림 4〉 등재해도 스펙트럼

#### 4.2.2 원자력발전소에 대한 등재해도스펙트럼

본 연구에서는 원자력발전소 부지에 대한 등재해도 곡선을 도출하여 평가용스펙트럼이 지진 위험도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 그림 3에는 울진 원자력발전소 56호기를 대상으로 한 재해도 곡선을 보여주고 있다.<sup>(16)</sup> 재해도 곡선을 사용하여 국내 원전부지에 대한 등재해도 스펙트럼을 그림 4와 같이 도출하였다. 연초과확률이  $10^{-4}$ 년에 해당하는 등재해도 스펙트럼을 이용하여 취약도 변수를 변환하였다.<sup>(17)</sup> 등재해도 스펙트럼의 영주기 가속도 (Zero Period Acceleration, ZPA)는 국내 원전의 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)인 0.2로 하였다.

### 4.3 UHS를 이용한 취약도 평가

#### 4.3.1 등재해도스펙트럼에서의 안전계수

기기의 평균 지진내력은 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다. 전술한 바와 같이 안전계수( $F$ )는 기기의 내력 및 응답과 관계된 다양한 계수들의 조합으로 구성된다. 식 (2)는 기기의

지진내력( $A_q$ )과 입력 지진의 최대지반가속도( $A_{SSE}$ )에 기인한 기기 위치에서의 가속도 수준( $S_a$ )와의 관계를 이용하여 다음 식 (4)와 같이 다시 표현할 수 있다.<sup>(17),(18)</sup>

$$A_m = \frac{A_q}{S_a} \cdot F_c \cdot A_{SSE} = F_c \cdot A_q \cdot \left( \frac{A_{SSE}}{S_a} \right) \quad (4)$$

여기서,  $F_c$ 는 평균지반운동내력( $A_m$ )에 대한 보수성을 고려하여 산정된 안전계수이다. 이 안전계수는  $A_q$ 와  $S_a$ 를 구하는 과정에서 발생한 고유의 보수성을 포함하고 있다. 식 (4)에서  $A_{SSE}/S_a$ 는 건물의 응답에 기인한 SSE 수준에서의 스펙트럴 응답이다. 이러한 스펙트럴 증폭은 건물의 해석에 사용한 입력지진의 응답스펙트럼의 형상에 따라 변화하게 된다. 등재해도 스펙트럼의 영향을 반영하여 지진취약도 변수를 산정하기 위해서 평균지반운동내력은 두 개의 스펙트럼 형상의 차이점에 기인한 스펙트럴 증폭의 차이점을 반영하도록 수정하여야 한다. 이러한 영향은  $F_{UHS}$ 라는 계수로써 반영한다. 등재해도 스펙트럼에서 기기기반 평균 지반운동내력인  $A_{m,UHS}$ 는 다음의 식 (5)로 구할 수 있다.

$$A_{m,UHS} = A_m \cdot F_{UHS} \quad (5)$$

여기서, 두 개의 지진파의 차이를 보정하기 위한 계수인  $F_{UHS}$ 는 다음의 식 (6)으로 구할 수 있다.<sup>(17)</sup>

$$F_{UHS} = \frac{AF_{SSS}}{AF_{UHS}} = \frac{SA_{SSS}}{SA_{UHS}} \quad (6)$$

여기서,  $AF_{SSS}$ 와  $AF_{UHS}$ 는 부지고유응답 스펙트럼과 등재해도 스펙트럼의 스펙트럼값의 증폭이다. 또한  $SA_{SSS}$ 와  $SA_{UHS}$ 는 각각 부지고유 응답스펙트럼과 등재해도 스펙트럼의 스펙트럴 가속도 응답이다.

$F_{UHS}$ 는 구조물이나 기기의 동적 특성에 따라 달라지며, 기기의 경우 기기가 설치된 위치에 따라 그 값이 달라지게 된다. 즉, 지반상에 설치된 기기와 구조물 내에 설치된 기기의 증폭 정도가 다르며 또한 구조물 내 각 층에서의 응답이 서로 다르기 때문이다.

구조물이나 지반에 설치된 기기의  $F_{UHS}$ 는 구조물 및 기기의 고유진동수에서의 부지 고유스펙트럼과 등재해도 스펙트럼의 스펙트럴 가속도의 비가 되며, 강성이 큰 기기의 경우 그 값은 1이 된다. 구조물 내부 층에 설치된 기기의  $F_{UHS}$ 는 기기의 고유진동수에서의 두 스펙트럼 입력에 의한 층응답스펙트럼의 스펙트럴 가속도 비가 된다. 그러나 등재

해도 스펙트럼을 입력으로 하여 작성된 층응답스펙트럼이 없을 경우  $F_{UHS}$ 는 기기가 설치된 건물의 고유진동수에 대한 스펙트럼의 스펙트럴 가속도 비로 간주할 수 있다. 이는 기기가 설치된 구조물 내부 임의의 층에서의 지진동은 구조물 고유진동수에서의 응답에 의해 지배되기 때문에 합당한 것으로 볼 수 있다.

### 4.3.2 랜덤성 및 불확실성 평가

본 연구에서는 등재해도 스펙트럼에서의 랜덤성과 불확실성의 대수표준편차를 구하기 위하여 2차 모멘트 방법과 두가지 대수표준편차 사이의 경험적 관계를 사용하였다. 랜덤성과 불확실성을 나타내는 변수인  $\beta_R$ 과  $\beta_U$ 은 다음의 식 (7)을 이용해서 구할 수 있다.<sup>(18)</sup>

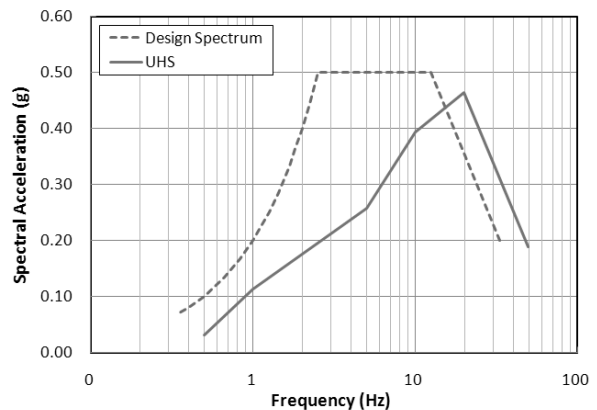
$$\beta_R = \ln \left( \frac{SA_{M+1\sigma}}{SA_M} \right), \quad \beta_U \approx \frac{2}{3} \beta_R \quad (7)$$

여기서,  $SA_M$ 과  $SA_{M+1\sigma}$ 는 각각 등재해도 스펙트럼의 평균값 및  $1\sigma$  수준에서의 스펙트럴 가속도응답이다. 여기서의  $\sigma$ 는 표준편차를 의미한다.

## 5. 위험도 평가 결과

### 5.1 취약도 평가 결과

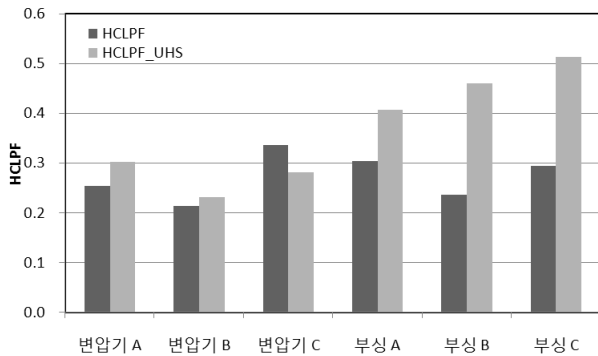
본 연구에서는 구조물에 대한 지진위험도 평가시 평가용 스펙트럼의 선정에 따른 차이를 분석하기 위하여 기존에 김민규 등<sup>(19)</sup>이 국내 변전소를 대상으로 하여 평가한 변전소에 대한 지진취약도 평가 결과를 활용하였다. 기존의 취약도 평가는 전력시설물에 대한 설계지반응답스펙트럼을 이용하여 수행하였으므로 그림 5에 전력시설물에 대한 설계응답스펙트럼과 등재해도 스펙트럼을 동일한 최대지반가속도에



〈그림 5〉 설계응답스펙트럼과 등재해도 스펙트럼의 비교

〈표 1〉 평가용 스펙트럼에 따른 전력시설물의 HCLPF의 변화

	$A_m$	$\beta$	HCLPF	고유진동수	$SA_{SSS}$	$SA_{UHS}$	$F_{UHS}$	$AM_{UHS}$	$HCLPF_{UHS}$
변압기 A	0.516	0.304	0.254	13Hz	0.492	0.415	1.187	0.613	0.302
변압기 B	0.442	0.310	0.214	15Hz	0.463	0.429	1.080	0.477	0.232
변압기 C	0.692	0.310	0.336	20Hz	0.390	0.464	0.840	0.582	0.282
부싱 A	0.619	0.304	0.305	9.3Hz	0.5	0.374	1.334	0.826	0.407
부싱 B	0.489	0.311	0.236	5Hz	0.5	0.257	1.945	0.950	0.459
부싱 C	0.597	0.303	0.295	6.1Hz	0.5	0.287	1.740	1.040	0.513



〈그림 6〉 평가용 스펙트럼에 따른 취약도 변화

대하여 비교하여 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 설계응답스펙트럼은 저진동수 영역에서 등재해도 스펙트럼에 비하여 매우 큰 스펙트럴 응답을 갖는 것을 알 수 있다. 반면 고진동수 영역에서는 다소 차이를 보이고 있지만 저진동수 영역에 비하여 큰 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

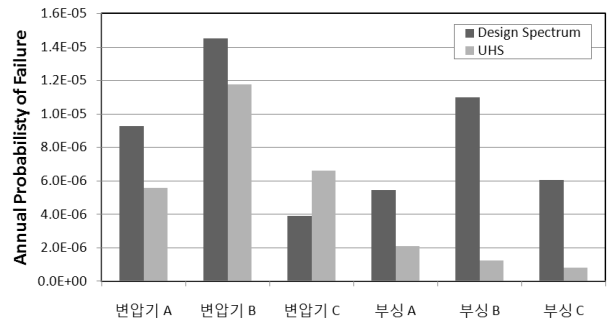
각각 3종류의 변압기와 절연애자에 대한 기존의 평가결과와 등재해도 스펙트럼에 의한 변환 결과를 표 1과 그림 6에 정리하였다. 설계응답스펙트럼을 이용한 기존의 변압기와 부싱에 대한 취약도 변수를 이용하여 HCLPF값을 산정하였으며, 수치해석결과를 바탕으로 산정된 각 기기의 고유진동수를 이용하여 변환계수인  $F_{UHS}$ 를 산정하여 최종적으로 등재해도 스펙트럼을 적용하였을 때의 HCLPF를 재산정하였다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 기기의 고유진동수 영역이 약 15Hz 미만인 경우 HCLPF의 값이 등재해도 스펙트럼을 사용하였을 때 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 15Hz를 초과하는 고진동수 기기의 경우는 오히려 HCLPF가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 많은 기기의 고유진동수 범위인 5-10Hz 부근에서 설계응답스펙트럼을 이용한 지진취약도 평가의 결과는 기기의 실제 지진내력을 과소평가할 수 있는 가능성이 있음을 알 수 있다.

## 5.2 위험도 평가

취약도 값의 변화에 따른 위험도결과의 비교를 위하여 재

〈표 2〉 평가용 스펙트럼에 따른 전력시설물의 위험도 평가

	고유진동수	연손상확률	
		설계응답스펙트럼	등재해도스펙트럼
변압기 A	13Hz	9.27E-06	5.59E-06
변압기 B	15Hz	1.45E-05	1.17E-05
변압기 C	20Hz	3.89E-06	6.63E-06
부싱 A	9.3Hz	5.43E-06	2.09E-06
부싱 B	5Hz	1.10E-05	1.25E-06
부싱 C	6.1Hz	6.04E-06	8.20E-07



〈그림 7〉 평가용 응답스펙트럼에 따른 지진위험도의 변화

해도 곡선을 이용한 위험도 평가를 수행하였다. 위험도 평가를 위한 재해도 곡선으로는 그림 3에서의 최대가속도에 대한 연초과 확률을 나타낸 곡선으로 선정하였다. 정확한 지진위험도의 산정을 위해서는 변전소가 위치한 부지에서 지진재해도 곡선을 이용하여야 하지만 본 연구는 평가용 지반응답스펙트럼에 따른 지진위험도의 변화를 평가하기 위한 것으로서 울진원전부지를 대상으로 작성한 재해도곡선을 사용하였다. 또한 국내의 경우 기타부지에 대한 지진재해도 곡선이 제시된 것이 거의 없으며 국내의 지진재해도 곡선이 주파수 특성에서 많은 부분 유사성을 가질 것으로 판단되므로 비교차원에서 울진부지에 대한 지진재해도 곡선을 이용하였다.

부지고유 응답스펙트럼과 등재해도 스펙트럼을 이용하여 각 기기의 지진위험도를 평가하여 표 2와 그림 7에 도시하였다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 부지고유 지반응답스펙트럼을 사용한 경우와 등재해도 스펙트럼을 사용한 경우

지진위험도에서 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 특별히 주요 기기의 경우 등재해도 스펙트럼을 적용하여 평가한 경우 지진위험도가 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 그림 1에서 정의한 바와 같이 지진위험도는 지진재해도곡선과 지진취약도 곡선의 공통부분의 면적에 비례하므로 그림 5에서 비교한 바와 같이 등재해도 스펙트럼의 고유진동수가 부지고유 응답스펙트럼과 비교하여 크게 고진동수 부분으로 치우치므로 겹치는 부분의 면적이 감소하기 때문이다. 따라서 일부 기기의 경우 지진위험도가 과대평가되고 있는 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 전력설비를 대상으로 하여 설계응답스펙트럼을 이용하여 구한 기존의 취약도 결과를 등재해도 응답스펙트럼을 이용한 값으로 변환하는 방법을 제시하였으며 그 결과로 지진취약도 평가결과인 고신뢰도 저파손확률(HCLPF)값과 또한 각 설비별 지진위험도를 평가하여 지반응답스펙트럼에 따른 위험도의 변화를 분석하였다. 본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 등재해도 스펙트럼을 사용하여 지진취약도 분석결과를 수정한 결과 대부분의 구조물 및 기기의 메디안 지반가속도 성능이 증가하는 것으로 나타났으며, 결과적으로 국내 전력시설물에 대한 지진취약도가 과소 평가될 수 있음을 알 수 있었다.
2. 검토 대상 설비에 대한 지진리스크 평가 결과 등재해도 스펙트럼에 의한 지진리스크가 크게 감소하는 것으로 나타나므로 현재의 설계 응답스펙트럼에 의한 방법이 보수적인 결과를 제시할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 설계응답스펙트럼과 국내지반에서의 등재해도 스펙트럼의 탁월 주파수 영역의 차이가 발생하기 때문이며 이로 인하여 전력설비의 지진위험도가 지나치게 보수적으로 판단될 수 있음을 알 수 있다. 설계응답스펙트럼은 설계의 안전성을 위하여 많은 보수성을 포함하고 있는 것이므로 시설물에 대한 지진취약도 평가시에는 평가용 지반응답스펙트럼의 선정에 세심한 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-5208)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. Kennedy, R.P. and Ravindra, M.K., "Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies," *Nuclear Engineering and Design*, 79, 47-68, 1984.
2. McGuire, R.K., *Seismic Hazard and Risk Analysis*, Earthquake Engineering Research Institute, 2004.
3. 국립방재교육연구원 방재연구소, "교량구조물의 지진위험도 함수 국산화 연구," 2007. 9.
4. 김상훈, "다경간 콘크리트 교량의 지진 취약도, 한국지진공학회 논문집," 제7권, 제6호, 35-47, 2003.
5. 김상훈, "Steel Jacket으로 보강된 콘크리트 교량에 대한 지진 취약도 개발," 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제5호, 75-83, 2003.
6. 국립방재교육연구원 방재연구소, "저층 구조물의 지진취약도 함수 도출기법 비교검토," 2007. 12.
7. Ellingwood, B.R. Celik, O.C. and Kinali, K. "Fragility assessment of building structural systems in mid-America," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 1935-1952, 2007.
8. 국립방재교육연구원 방재연구소, "전력시설물의 지진취약도 함수 국산화 연구," 2008. 2.
9. Ang, A.H.-S., Pires, J.A. and Villaverde, R., "A model for the seismic reliability assessment of electric power transmission systems," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 51, 7-22, 1996.
10. Camensig, C., Bresesti, L., Clementel, S. and Salvetti, M., "Seismic risk evaluation for high voltage air insulated substations," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 55, 179-191, 1997.
11. US NRC Regulatory Guide 1.60., *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, 1973.
12. Hwang, H.H.M and Huo, J.R., "Seismic fragility analysis of electric substation equipment and structures," *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 13, No. 2, 107-116, 1998.
13. 울진 5,6호기 확률론적 안전성 평가 (II단계 연구): 외부사건 분석, 2002. 06. 한국수력원자력(주)
14. EERI. "The Basics of Seismic Risk Analysis," *Earthquake Spectra* 5, 675-702, 1989.
15. Shin, J. S., Lee, J. R., and Jeong, E. H., "Computation of uniform hazard spectrum for wolsong nuclear power plants," *Proceedings of EESK Conference-Fall*, 1998.
16. Seo, J. M., Yun, K. H., and Lee, S. K., "Seismic hazard of the Korean Npp sites: recent innovation in the R&D and hazard results," *Proc. of the 7th Korea-Japan PSA Workshop*, Jeju, Korea, 2002.
17. Llambias, J. M., "The use of the uniform risk spectra in the seismic PSA for a PWR power station," *Nuclear Engineering and Design* 154, 193-201, 1995.
18. 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, Number  
6, 586-595, 2002.

19. 김민규, 전영선, 최인길, 오금호, “고장수목을 이용한 변전소의 지진취약도 분석,” 한국 지진공학회 논문집, Vol. 13, No. 2, 47-58, 2009. 4.