

등재해도 스펙트럼을 이용한 지진취약도 분석  
Seismic Fragility Analysis Using Uniform Hazard Spectrum

최인길, 전영선  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

연관희  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 연구에서는 기존의 지진취약도 파라메타를 등재해도 스펙트럼에 기초한 결과로 변환하는 방법에 대해 기술하고 이를 이용하여 대표적인 원전구조물 및 기기의 지진취약도 파라메타를 산정하였다. 지진취약도 파라메타의 변환을 위해 등재해도 스펙트럼 변환계수  $F_{UHS}$ 를 산정하고 이를 이용하여 기존의 취약도 파라메타를 수정하였다. 또한 울진 원전부지에 대한 이용 가능한 재해도 자료를 이용하여 등재해도 스펙트럼을 작성하고 이를 취약도분석에 사용하였다. 대표적인 원전 구조물에 대한 취약도 파라메타 산정 결과 저진동수 영역에서의 증폭이 작게 발생하는 등재해도 스펙트럼의 특성으로 인해 대부분의 구조물 및 기기의 HCLPF가 증가하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In this paper, a method for modifying the seismic fragility parameters that are calculated based on the site specific median spectrum is described. This simple method was developed to incorporate the effects of the uniform hazard spectrum(UHS). The seismic fragility parameters of typical NPP components are modified using the uniform hazard spectrum. The modification factor,  $F_{UHS}$ , is used to modify the original fragility parameters. In this study, a uniform hazard spectrum is developed using available seismic hazard data for Uljin NPP site. This uniform hazard spectrum is used for the modification of fragility parameters. The HCLPF acceleration levels of the typical components are increased due to the effects of the uniform hazard spectrum.

## 1. 서론

원자력발전소의 지진시 안전성을 평가하기 위해 원전 내에 설치된 구조물 및 기기 등에 대한 현실적인 성능 및 응답 평가를 통한 SPRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment) 및 SMA(Seismic Margin Analysis)를 수행한다. 이를 위해서는 입력지진동에 대한 평가가 이루어져야 한다. 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 우리나라 원전에 적용할 경우 큰 보수성을 가지게 된다.

원전 구조물 및 기기의 내진성능 평가를 위한 지진취약도 분석이나 내진여유도 분석에서는 일반적으로 여러 가지 형태의 응답스펙트럼이 사용되고 있다. 지진취약도 분석에서는 부지 고유의 응답스펙트럼이나 등재해도 스펙트럼을 사용하는 것이 바람직하며 이들에 대한 자료가 불충분 할 경우 NUREG/CR-0098[2]에서 제시하는 메디안 응답스펙트럼을 사용하고 있다.

구조물 및 기기의 설계, 해석 및 SPRA에서는 이들 스펙트럼을 첨두지반가속도(Peak Ground Acceleration; PGA) 값을 이용하여 스케일링하여 사용하고 있다. 그러나 이들 스펙트럼은 모든 진동수 범위에서 동일한 초과확률을 나타내지 못하고 있어 전체 진동수 구간에서 동일한 초과확률을 가진 등재해도 스펙트럼의 개발 및 이를 이용한 설계, 해석이 크게 증가하고 있는 실정에 있다[3].

본 연구에서는 우리나라 원전 부지의 지진재해도 분석자료를 이용하여 등재해도 스펙트럼을 작성하였으며, 기존의 지진취약도 분석 결과를 등재해도 스펙트럼에 근거한 취약도 결과로 변환할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 등재해도 스펙트럼을 이용한 대표적인 구조물 및 기기에 대한 취약도 분석을 수행하여 기존의 부지고유응답 스펙트럼을 이용한 취약도 분석 결과와 비교하였다.

## 2. 지진취약도 분석

구조물의 지진취약도 계산에서는 안전계수(factor of safety)로 불리는 일련의 랜덤변수를 이용한다. 설계시의 SSE 수준을 초과하는 메디안 지반가속도 내력(median seismic capacity)은 안전계수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

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

여기서,  $A_m$  및  $A_{SSE}$ 는 각각 중앙값 지반운동 가속도 내력 및 SSE(Safe Shutdown Earthquake) 하중의 최대지반가속도를 나타낸다. 이 식에서 안전계수  $F$ 를 구조물의 성능 및 응답관련 랜덤변수를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$F = F_S F_\mu F_{RS} \quad (2)$$

여기서,  $F_S$ ,  $F_\mu$  및  $F_{RS}$ 는 각각 구조물의 강도계수, 구조물의 비탄성 에너지 흡수계수 및 구조물의 응답관련 계수를 나타낸다.

기기의 취약도 분석을 위해서는 기기의 성능 및 응답관련 변수 뿐 아니라 구조물의 응답관련 변수를 고려하여야 한다. 기기의 취약도 분석에 사용되는 안전계수  $F$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = F_{EC} \cdot F_{RS} \cdot F_{ES} \quad (3)$$

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.

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.

$$\beta_R = [\sum(\beta_r)_i^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$\beta_U = [\sum(\beta_u)_i^2]^{1/2} \quad (5)$$

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

구조물 및 기기의 내진성능은 취약도곡선 또는 HCLPF(High Confidence of Low Probability of Failure) 성능으로 나타낸다. 일반적으로 구조물 및 기기의 개별적인 내진 성능을 나타내는 지표로 HCLPF 성능이 사용된다. HCLPF 성능은 95% 신뢰도 수준에서 파괴확률이 5% 이하가 되는 성능으로 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\text{HCLPF} = A_m \cdot \exp[-1.65(\beta_U + \beta_R)] \quad (6)$$

### 3. 등재해도 스펙트럼 작성

#### 3.1 지진재해도 분석

지진재해도 분석이라 함은 다양한 크기의 지진이 임의 부지에 발생할 수 있는 확률을 평가하고 이들 지진으로부터 스펙트럼 형상을 결정하는 것을 말한다. 지진재해도 분석은 그 특성상 결과를 확률론적으로 나타내기 때문에 확률론적 지진재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis; PSHA)이라고도 부른다.

원전 부지에서의 지진재해도는 일반적으로 재해도곡선으로 나타낸다. 지진재해도 곡선

은 초과확률 대 첨두지반가속도의 관계를 그린 것이다. 지진재해도 분석에서는 역사지진 자료, 계기지진자료 뿐 아니라 활성 단층 및 기타 지진원 자료 등을 이용하여 발생가능한 지진의 규모 등을 추정하고, 거리 및 지반특성에 따른 지진파의 전달특성을 평가하여 최종적으로 임의부지에서 지진재해도를 평가하게 된다.

### 3.2 등재해도 스펙트럼 작성방법

등재해도 스펙트럼의 작성은 확률론적 지진재해도 분석에 의한 재해도곡선 작성 절차와 유사한 과정을 거친다. 앞서 기술한 바와 같이 지진재해도 곡선에서는 첨두지반가속도의 초과확률로서 나타낸다. 등재해도 스펙트럼의 작성을 위해서는 먼저 재해도곡선의 작성 절차와 유사한 방법으로 그림 1 (a)와 같은 진동수별로 지진가속도 초과확률을 나타내는 스펙트럴 재해도곡선(spectral hazard curve)을 작성한다. 이를 이용하여 그림 1 (b)와 같은 등재해도 스펙트럼을 작성할 수 있다[5,6].

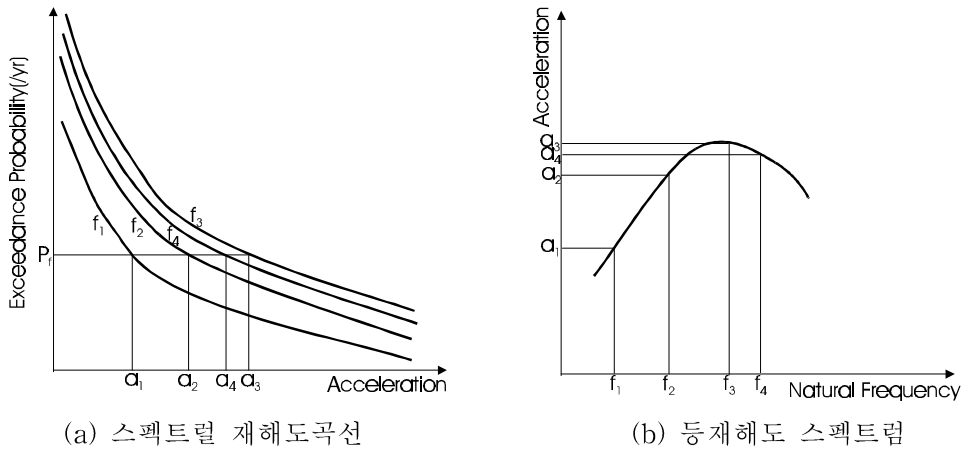


그림 1. 등재해도 스펙트럼 작성 방법

수직운동에 대한 등재해도 스펙트럼은 수평운동에 대한 등재해도 스펙트럼을 작성한 후 Atkinson의 연구결과[7]로 제시된 다음의 식을 이용하여 작성할 수 있다.

$$\log \frac{H}{V} = 0.0519 + 0.117 \log f_n \quad (7)$$

여기서,  $H$ 와  $V$ 는 각각 수평 및 수직 방향의 스펙트럴 가속도를 나타내며 이때 단위는  $gal (cm/sec^2)$  이다. 또한  $f_n$ 은 각 스펙트럴 재해도곡선의 진동수를 나타낸다.

### 3.3 원전 부지의 등재해도 스펙트럼

본 논문에서 제시하고 있는 등재해도 스펙트럼의 영향을 고려한 지진취약도 분석의 적용을 위해 울진 원전 부지의 지진재해도 분석에 활용된 재해도 자료 중 활용 가능한 일

부 자료를 이용하여 등재해도 스펙트럼을 작성하였다. 먼저 지진재해도 자료를 이용하여 진동수별 재해도 곡선을 그림 2와 같이 작성하고 이를 이용하여 그림 3과 같은 여러 가지 등재해도 스펙트럼을 작성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 대체적으로 저진동수 영역에서는 비교적 작은 증폭을 보여주고 있으며 고진동수 영역에서는 크게 증폭되는 것으로 나타났다.

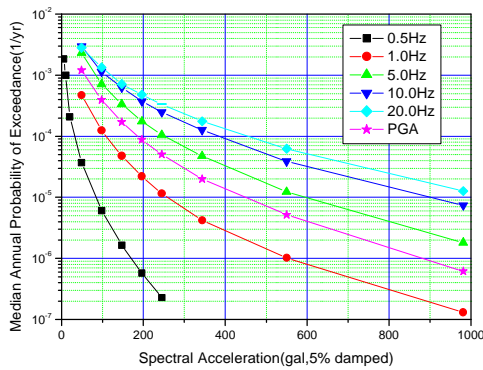


그림 2. 진동수별 재해도곡선

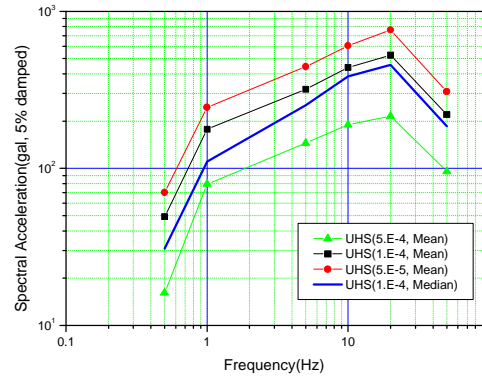


그림 3. 등재해도 스펙트럼

본 연구에서는 그림 3의 스펙트럼 중 초과확률  $1.0E-4$ 의 메디안 스펙트럼의 최대지반 가속도를 SSE에 맞도록 스케일링하여 취약도분석에 사용하였다. 그림 4에 기존의 우리나라 원전 SPRA에 사용되어온 고리 원전 부지의 메디안 스펙트럼과 비교하여 나타내었다.

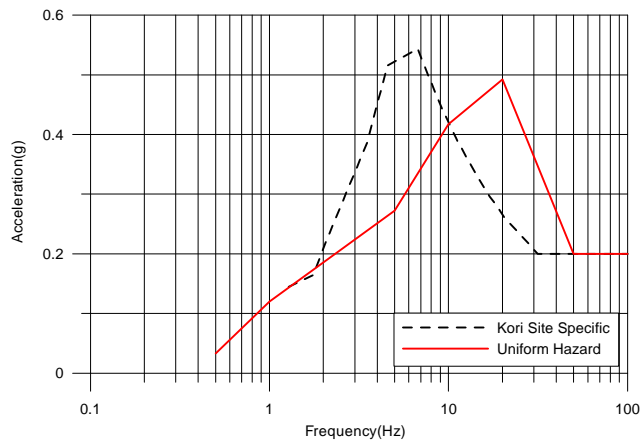


그림 4. UHS와 고리 메디안 스펙트럼의 비교

#### 4. 등재해도 스펙트럼을 이용한 지진취약도 분석

##### 4.1 안전계수의 평가

원전 구조물 및 기기의 메디안 지반가속도 성능은 앞에서의 식 (1) 및 (3)과 같이 쓸 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 안전계수  $F$ 는 응답 및 성능과 관련된 여러 가지 계수

로 구성되어 있다. 이중 내진성능을 나타내는 계수  $A_q$ 와 기기가 위치한 지점에서의 스펙트럴 가속도  $S_a$ 의 관계를 이용하여 위의 식 (1) 및 (3)을 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$A_m = \frac{A_q}{S_a} \cdot F_c \cdot A_{SSE} \quad (8)$$

또는

$$A_m = F_c \cdot A_q \cdot \left( \frac{S_a}{A_{SSE}} \right)^{-1} \quad (9)$$

여기서  $F_c$ 는  $A_m$ 에 포함된 보수성을 나타내기 위한 계수이며 여기에는  $A_q$  및  $S_a$ 를 산정하기 위해 수행한 구조물 및 기기의 응답해석에 포함된 보수성(즉,  $F_{RS}$  및  $F_{ES}$ )들이 포함되어 있다. 식 (9)에서  $S_a/A_{SSE}$ 는 구조물 내부에서 구조물의 응답에 의해 지반 운동이 증폭되는 정도를 나타낸다. 이러한 증폭의 정도는 구조물의 해석에 사용된 입력 스펙트럼의 형상에 따라 달라지게 되며, 따라서 부지 고유응답스펙트럼을 사용한 경우와 등재해도 스펙트럼을 사용한 경우 증폭의 정도가 크게 달라지게 된다.

이상에서 기술한 바와 같이 지반 고유응답스펙트럼을 이용하여 지진취약도 분석을 수행한 경우 이를 등재해도 스펙트럼으로 평가한 값으로 변환하기 위해서는 두 입력지진 스펙트럼의 차이를 다음의 식과 같이 반영하여야 한다.

$$A_{m,UHS} = A_m \cdot F_{UHS} \quad (10)$$

여기서  $A_{m,UHS}$ 는 등재해도 스펙트럼을 이용한 구조물 및 기기의 메디안 지반가속도 내력을 나타내며, 변환계수  $F_{UHS}$ 는 두 스펙트럼간의 증폭정도의 차이를 보정하기 위한 계수로 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$F_{UHS} = \frac{\text{Spectral Amplification(Site Specific Spectrum)}}{\text{Spectral Amplification(UHS)}} \quad (11)$$

스펙트럼값의 증폭(spectral amplification)은 스펙트럴 가속도와 지반가속도의 비를 나타낸다. 따라서 동일한 첨두지반가속도를 적용할 경우 위의 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$F_{UHS} = \frac{\text{Spectral Acceleration(Site Specific Spectrum)}}{\text{Spectral Acceleration(UHS)}} \quad (12)$$

$F_{UHS}$ 는 구조물이나 기기의 동적 특성에 따라 달라지며 기기의 경우 기기가 설치된 위치에 따라 그 값이 달라지게 된다. 즉, 지반 상에 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 등재해도 스펙트럼을 입력으로 하여 작성된 층응답스펙트럼이 없을 경우  $F_{UHS}$ 는 기기가 설치된 건물의 고유진동수에서의 두 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.

등재해도 스펙트럼은 재해도 수준이나 운동 방향에 따라 달라지기 때문에 PSA에서는 재해도 수준에 따른 각 방향(수평 2방향 및 수직방향)의  $F_{UHS}$ 를 각각 산정하여야 한다.

## 4.2 랜덤성 및 불확실성 평가

지반운동의 랜덤성으로 인한 변동성은 등재해도 스펙트럼을 사용하더라도 영향을 받지 않는 것으로 가정할 수 있다. 그러나 부지 고유응답스펙트럼에 존재하는 보수성이  $F_c$ 에 포함되어 있을 경우에는 랜덤성에 대한 대수표준편차  $\beta_r$ 을 재평가하여야 한다. 그러나 불확실성에 의한 변동성에서는 등재해도 스펙트럼이 가지고 있는 불확실성을 반영하여야 한다. 등재해도 스펙트럼 상의 불확실성은 10%, 50% 및 90% 신뢰도수준의 등재해도 스펙트럼을 이용하여 통계적인 방법으로 구할 수 있다.

과거에 수행된 SPRA에서 설계스펙트럼과 같이  $1\sigma$  수준이 아닌 부지 고유의 메디안 스펙트럼을 사용하였으므로 랜덤성 및 불확실성에 대한 대수표준편차가 등재해도 스펙트럼과 큰 차이는 없을 것으로 추정되며, 이들 변수의 차이가 최종적인 결과에 크게 영향을 미치지 않으므로 동일한 값을 갖는 것으로 가정하여 취약도 분석을 수행하였다.

## 5. 지진취약도 평가 예

원전 구조물 및 기기의 지진취약도에 미치는 등재해도 스펙트럼의 영향을 평가하기 위해 비교적 낮은 HCLPF 값을 갖는 대표적인 구조물 및 기기에 대한 취약도 파라메타를 재산정 하였다. 부지 고유의 메디안 스펙트럼을 이용한 이들 구조물 및 기기의 취약도 파라메타를 구조물 및 기기의 위치, 고유진동수 및 파괴모드와 함께 표 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 대표적인 구조물로는 보조건물을 선정하였으며 주요 기기들은 대부분 보조건물 내에 위치하는 것들이다. 그 외에 지반 상에 설치된 복수저장탱크(CST)에 대한 취약도 파라메타를 나타내었다. 이들 구조물 및 기기의 취약도분석을 위해 건물 자체의 변환계수 및 기기가 위치한 건물의 고유진동수를 이용한 변환계수를 산정하였다. 산정된 변환계수를 이용하여 취약도 파라메타를 수정한 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2에서 보는 바와 같이 보조건물의 변환계수는 1.486으로 나타났으며 이는 보조건물 및 보조건물에 위치한 대부분의 기기에 적용할 수 있다. 따라서 이들 구조물 및 기기의

메디안 지반가속도 성능 및 HCLPF 값은 1.486배 증가하게 된다. 복수저장탱크의 경우에는 충격모드의 고유진동수가 9.72Hz, 유동모드의 고유진동수가 0.24Hz로 나타났다. 그러나 탱크 응답의 대부분이 충격모드에 의한 것이므로 충격모드에서의 스펙트럼 값을 기준으로 변환계수를 산정하였다.

우리나라 SPRA에서는 지진재해도 분석 결과를 반영하여 메디안 지반가속도 성능 및 HCLPF가 각각 1.5g 및 0.65g 이상일 경우 노심손상에 미치는 영향이 매우 적은 것으로 판단하여 선별제거하고 상세한 취약도 분석을 생략한다. 표 2에서 보는 바와 같이 등재해도 스펙트럼의 영향을 반영할 경우 많은 기기가 선별제거 대상에 포함될 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 주요 구조물 및 기기의 취약도 파라메타

구조물 및 기기명	위치	진동수 (Hz)	파손모드	$A_m$ (g)	$\beta_R$	$\beta_U$	HCLPF (g)
보조건물		7.20	벽체 전단파손	2.14	0.29	0.36	0.73
Condensate Storage Tank	Ground	9.72	Sliding	1.04	0.25	0.24	0.46
CCW Surge Tank	PAB 165'	17.6	Concrete Coning	2.00	0.41	0.47	0.47
ECW Pump	PAB 77'	37.2	Pump H.D bolt	1.85	0.36	0.27	0.65
ECW Compression Tank	PAB 77'	>33	Anchorage	1.00	0.35	0.20	0.40
4.16kV Switchgear	PAB 100'-6"	6	functional	1.33	0.33	0.29	0.48
			structural	1.99	0.33	0.32	0.68
480V MCC	PAB 165'	11	functional	1.33	0.33	0.29	0.48
			structural	1.99	0.33	0.33	0.67

표 2. 등재해도 스펙트럼을 이용한 주요 구조물 및 기기의 취약도 파라메타

구조물 및 기기명	진동수 (Hz)	$F_{UHS}$	파손모드	$A_{m,UHS}$ (g)	$\beta_R$	$\beta_U$	HCLPF (g)
보조건물	7.20	1.486	벽체 전단파손	3.18	0.29	0.36	1.09
Condensate Storage Tank	9.72	1.00	Sliding	1.04	0.25	0.24	0.46
CCW Surge Tank	7.20	1.486	Concrete Coning	2.97	0.41	0.47	0.70
ECW Pump	7.20	1.486	Pump H.D bolt	2.75	0.36	0.27	0.97
ECW Compression Tank	7.20	1.486	Anchorage	1.49	0.35	0.20	0.60
4.16kV Switchgear	7.20	1.486	functional	1.97	0.33	0.29	0.71
			structural	2.96	0.33	0.32	1.01
480V MCC	7.20	1.486	functional	1.98	0.33	0.29	0.71
			structural	2.95	0.33	0.33	1.00



## 5. 결론 및 고찰

부지 고유의 메디안 스펙트럼을 이용한 지진취약도 결과를 등재해도 스펙트럼의 영향을 고려하여 수정하기 위한 방법과 계산 예를 기술하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 우리나라 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도분석이 대부분 수행되었거나 수행되고 있어 이들 결과를 이용하여 등재해도 스펙트럼을 작성하고 이를 SPRA에 활용하는 것이 바람직하다.
- 울진 원전 부지의 등재해도 스펙트럼은 고리 메디안 스펙트럼에 비해 저진동수 영역에서 증폭이 매우 작고 고진동수 영역에서 크게 증폭되는 것으로 나타났다.
- 본 연구에서 제시한 방법을 사용하여 기존의 취약도결과를 비교적 용이하고 정확하게 수정할 수 있다.
- 등재해도 스펙트럼을 사용하여 지진취약도 분석결과를 수정한 결과 대부분의 구조물 및 기기의 메디안 지반가속도 성능이 증가하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 선별 제거가 가능한 구조물 및 기기가 크게 늘어 SPRA 수행을 간편하게 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 추후 등재해도 스펙트럼에서 나타나는 고진동수 영역에서의 큰 증폭현상이 고진동수에 민감한 기기에 미치는 영향에 대한 평가가 상세히 이루어져야 할 것이다.

## 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. Newmark, N. M. and Hall, W. J., Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants, NUREG/CR-0098, 1978.
3. Chin-Hsiung Loh, Wen-Yu Jean, and Joseph Penzien, "Uniform-Hazard Response Spectra-An Alternative Approach," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23, pp. 433-445, 1994.
4. R. P. Kennedy and M. K. Ravindra, "Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies," Nuclear Engineering and Design, 79, pp.47-68, 1984.
5. EERI, "The Basics of Seismic Risk Analysis," Earthquake Spectra 5, pp.675-702, 1989.
6. 신진수, 이종립, 정의호, "월성 원전 부지의 등재해도 스펙트럼 계산," 한국지진공학회 1998년도 추계학술대회 논문집, pp. 297-303, 1998.
7. Atkinson, G., "Notes on Ground Motion Parameters for Eastern North America: Duration and H/V ratio," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 83, pp. 587-596, 1993.
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, pp. 193-201, 1995.