

# 다중 지진 시나리오를 고려한 원전 격납구조물의 조건부 평균 스펙트럼 기반 지진취약도 평가

## Seismic Fragility Assessment of NPP Containment Structure based on Conditional Mean Spectra for Multiple Earthquake Scenarios

박원호<sup>1)</sup> · 박지훈<sup>2)\*</sup>

Park, Won Ho<sup>1)</sup> · Park, Ji-Hun<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>인천대학교 일반대학원 건축학과 석사과정, <sup>2)</sup>인천대학교 도시건축학부 교수

<sup>1)</sup>Graduate Student, Department of Architectural Design and Engineering, Incheon National University, <sup>2)</sup>Professor, Division of Architecture and Urban Design, Incheon National University

### / A B S T R A C T /

A methodology to assess seismic fragility of a nuclear power plant (NPP) using a conditional mean spectrum is proposed as an alternative to using a uniform hazard response spectrum. Rather than the single-scenario conditional mean spectrum, which is the conventional conditional mean spectrum based on a single scenario, a multi-scenario conditional mean spectrum is proposed for the case in which no single scenario is dominant. The multi-scenario conditional mean spectrum is defined as the weighted average of different conditional mean spectra, each one of which corresponds to an individual scenario. The weighting factors for scenarios are obtained from a deaggregation of seismic hazards. As a validation example, a seismic fragility assessment of an NPP containment structure is performed using a uniform hazard response spectrum and different single-scenario conditional mean spectra and multi-scenario conditional mean spectra. In the example, the number of scenarios primarily influences the median capacity of the evaluated structure. Meanwhile, the control frequency, a key parameter of a conditional mean spectrum, plays an important role in reducing logarithmic standard deviation of the corresponding fragility curves and corresponding high confidence of low probability of failure (HCLPF) capacity.

**Key words:** Conditional mean spectrum, Uniform hazard response spectrum, Multiple earthquake scenario, Deaggregation, HCLPF

## 1. 서론

원자력 발전소(nuclear power plant, NPP)의 확률론적 지진 안정성 평가(seismic probabilistic risk assessment, SPRA)에 대한 지진 위험을 정의하기 위하여 일반적으로 등재해도 스펙트럼(uniform hazard response spectrum, UHRS)이 사용되고 있다. 등재해도 스펙트럼은 전체 진동수 범위에서 각각의 스펙트럼 가속도가 모두 동일한 초과확률을 가진다. 그러나 등재해도 스펙트럼의 스펙트럼 가속도는 개별 진동수 간의 상관관계를 고려하지 않고 서로 독립적으로 결정되므로 전체 진동수 범위에서 동시에 등재해도 스펙트럼에 해당하는 스펙트럼 가속도가 발생할 가능성은 희박하다. 따라서 단일 사건에 대한 구조물의 지진 분석을 평가하기 위해서 등재

도 스펙트럼 또는 그에 맞추어 조정된 지반운동 시간이력을 적용하는 것은 지진 위험을 과대평가한다. 이와 같은 UHRS를 적용한 원전구조물의 SPRA는 기존에 다양한 연구에서 수행된 바 있다[1-7].

등재해도 스펙트럼의 보수적인 평가를 대체하기 위해 Baker(2011)에 [8] 의해 조건부평균 스펙트럼(conditional mean spectrum, CMS)이 제시되었다. 조건부평균 스펙트럼은 서로 다른 진동수 사이에서 스펙트럼가속도의 정규화된 대수적 편차(logarithmic deviation)를 나타내는 입실론(epsilon)의 상관계수를 사용하여 생성되며, 특정 제어 진동수(control frequency)에서 등재해도 스펙트럼과 동일한 스펙트럼 가속도를 갖는다. 또한, 입실론은 지진 발생의 특정 조건에 근거하여 예측된 평균 스펙트럼 가속도를 기준으로 하기 때문에 조건부평균 스펙트럼은 가정된 지진 시나리오에 의존한다. 결과적으로 조건부평균 스펙트럼은 등재해도 스펙트럼보다 더 사실적인 스펙트럼 형태를 나타내며, 진동수가 제어 진동수에서 멀어질수록 등재해도 스펙트럼보다 낮아지는 경향이 있다. 그러나 상대적으로 보수적인 접근이 요구되는 원자력 발전소의 확률론적 지진 안정성 평가에

\*Corresponding author: Park, Ji-Hun

E-mail: jhpark606@inu.ac.kr

(Received August 5, 2019; Revised October 1, 2019; Accepted October 7, 2019)

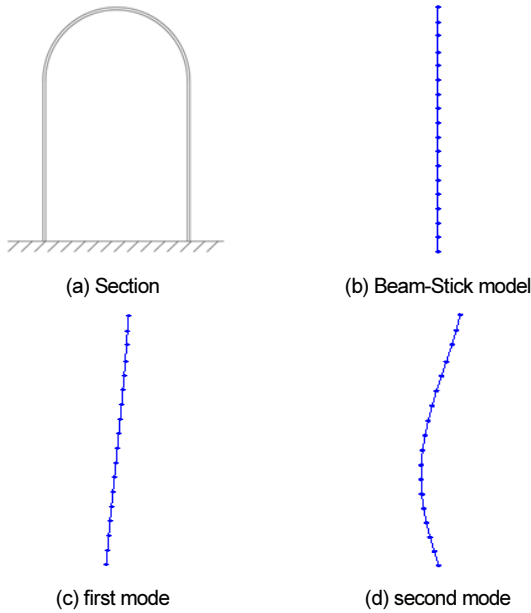


Fig. 1. Containment structure and mode shapes

있어서 조건부평균 스펙트럼의 적용 사례는 문헌에서만 제한적으로 발견된다[9]. 그러나 일반 건축물의 내진설계에 대한 연구 및 적용을 다수 발견할 수 있으며 이미 설계기준에도 도입된 바 있다[10-14].

이 연구에서는 조건부평균 스펙트럼을 원자력 발전소의 확률론적 지진 안정성 평가에 적용하였다. 조건부평균 스펙트럼은 제어 진동수 및 지진 시나리오 선택에 따라 달라진다[8]. 따라서 지진취약도에 대한 서로 다른 제어 진동수가 영향을 미치며, 지진 시나리오와 관련하여, 단일한 지배적 시나리오가 두드러지지 않는 경우 확률론적 지진 취약도 분석에 다양한 시나리오를 고려할 필요가 있다. 이 연구에서 원자력 발전소 부지의 등재해도 스펙트럼에 상응하는 조건부평균 스펙트럼은 원전 격납 구조물의 진동수 특성을 고려하여 다양한 제어 진동수를 적용하여 구성하였다. 또한 조건부평균 스펙트럼은 단일 지진 시나리오에 기초하여 산출되므로 복수의 지진 시나리오를 고려하기 위해 각각에 해당되는 조건부평균 스펙트럼을 산출하고 그 불확실성을 정량화하여 지진취약도 분석에 반영하였다. 응답스펙트럼에 기초한 지진 취약도 평가는 EPRI TR-103959의 절차를 사용하여 수행하였으며, 지진 취약도 곡선과 HCLPF 성능을 등재해도 스펙트럼과 조건부 스펙트럼에 대하여 각각 계산하고 비교하였다. 또한 단일 지진 시나리오 적용시와 다중 지진 시나리오 적용시의 차이를 비교 분석하였다.

## 2. 격납구조물의 모델

이 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 APR 1400[15]의 격납구조물을 대상으로 하였으며, 해석모델은 Fig. 1(b)와 같이 총 13개의 Beam-Stick 요소로 구성하였다. 고유 진동수는 1차 모드와 2차 모드에서 각각 4.10 Hz와 12.25 Hz이며, 이에 대한 모드 형상은 각각 Fig. 1(c)와 Fig. 1(d)에 나타내었다. 1차 모드와 2차 모드에서의 질량참여율은 90%를 초과한다. 대상 구조물의 고유진동수와 질량참여율은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Modal frequency and mass participation factor

Mode	Natural frequency (Cycle/sec)	Modal mass participation factor for translational degree of freedom	
		Mass (%)	Sum (%)
1	4.10	71.37	71.37
2	12.25	20.11	91.48
3	23.69	2.18	93.66
4	24.71	2.42	96.09
5	34.96	1.78	97.87
6	43.18	0.66	98.53
7	46.03	0.26	98.79

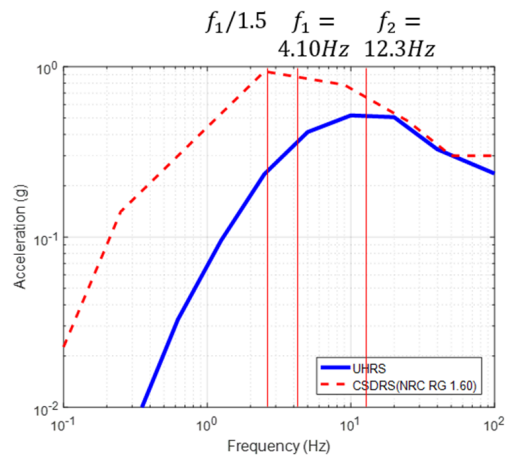


Fig. 2. UHRS and CSDRS for the example NPP

## 3. 응답스펙트럼 작성

### 3.1 등재해도 스펙트럼

등재해도 스펙트럼 작성은 조건부 스펙트럼 작성의 선행단계가 된다. 등재해도 스펙트럼은 신고리 원전이 위치한 고리 지역을 대상으로 하였으며, NRC RG 1.208에 따라[16] 1.0E-04의 연평균 초과확률에 대해서 산정하였다(KAERI, 2012). 지반운동 예측식은 국내의 중앙진 지역을 대상으로 Atkinson and Boore (2006)[17]의 지반운동 예측식(ground motion prediction equation)을 적용하여  $V_{s30} = 760$  m/s에 해당하는 지반의 등재해도 스펙트럼을 작성하였다. 여기서  $V_{s30}$ 은 깊이 30 m 까지에서 평균 전단파 속도를 의미한다. APR 1400에 나타나 있는 등재해도 스펙트럼과 공인 내진 응답 스펙트럼(certified seismic design response spectrum, CSDRS)을 Fig. 2에 나타내었다. 등재해도 스펙트럼은 20~50 Hz를 제외한 대부분의 진동수에서 NRC RG 1.60에 기초한 APR 1400의 CSDRS보다 훨씬 낮게 나타난다.

### 3.2 지진재해도 분해 및 주요 지진 시나리오 선정

조건부평균 스펙트럼의 제어 진동수는 구조물의 1차 및 2차 모드 고유진동수를 선정하였으며 비선형 거동으로 인한 강성 감소를 고려하여 1차 모

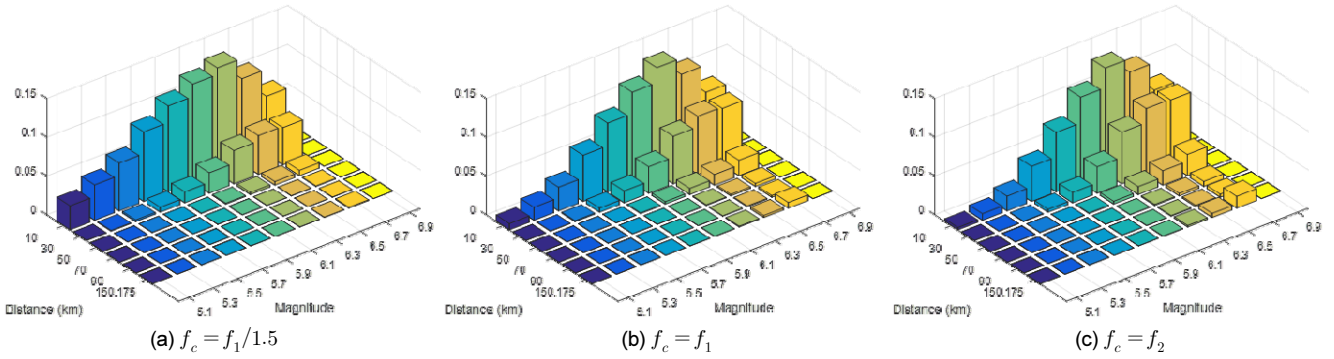


Fig. 3. Deaggregation of UHRS at each control frequency

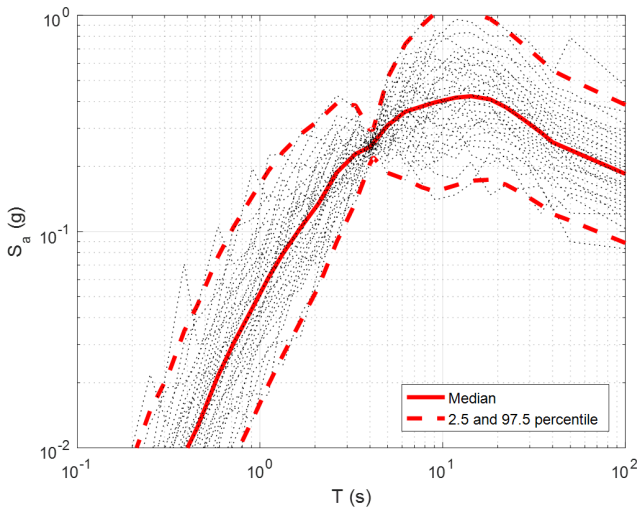


Fig. 4. Conditional spectrum for  $f_c = f_1$

드 진동수의 2/3배를 추가로 선정하였다. 여기서 2/3배는 비탄성 에너지 흡수계수 산정에 사용되는 유효 진동수와 탄성 진동수의 비가 약 1/2이나 적용 지진 재해도의 평균적 응답의 크기가 극한 변형 대비 크지 않음을 고려하여 좀 더 큰 값으로 가정하였다. 선정된 제어 진동수에 대한 등재해도 스펙트럼의 지진재해도 분해(deaggregation)을 수행한 결과는 Fig. 3에 나타났다. 가장 큰 기여도를 갖는 진앙 거리의 0~20 km의 범위에 규모는 6.2~6.4의 범위에 해당하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 3에서와 같이 단일 시나리오가 두드러지게 영향을 미치지 보다는 편차는 있으나 일정 범위의 특성치를 갖는 시나리오가 모두 상당한 기여도를 갖고 있으므로 복수의 주요 시나리오를 고려할 필요가 있다.

### 3.3 다중 시나리오에 의한 조건부평균 스펙트럼

각각의 제어진동수에 대하여 지진재해도 분해 결과에 따라 조건부평균 스펙트럼은 Fig. 3에서 최소 1% 이상의 기여도를 갖는 14~15개의 시나리오를 선정하여 산출하였다. 1차 모드 고유 진동수를 제어 진동수로 적용한 조건부 스펙트럼과 중앙값, 2.5 및 97.5% 백분위 수에 해당하는 스펙트럼과 함께 무작위성에 의한 각 진동수별 스펙트럼 가속도의 확률분포에 따른 30개의 모의 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. 30개의 모의 스펙트럼은 지진취약도 분석 시 스펙트럼 형상의 변동성 분석에 활용할 수 있다[18].

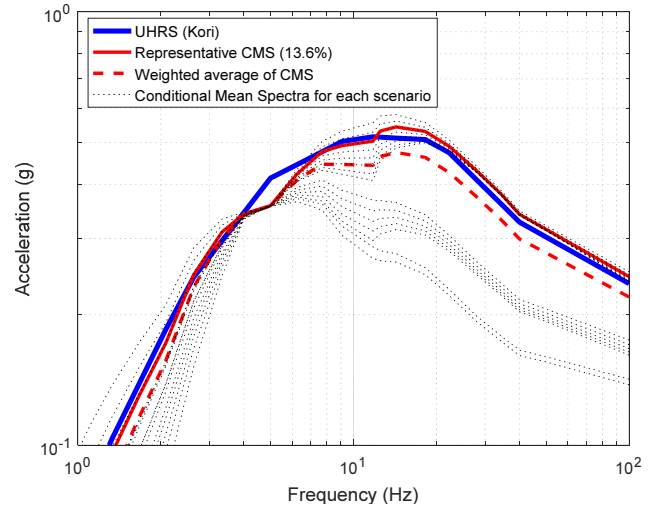


Fig. 5. CMS for each scenario and weighted average ( $f_c = f_1$ )

제어진동수  $f_c = f_1$ 에 대하여 각각의 지진시나리오에 대한 조건부평균 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. 또한 각각의 지진 시나리오 기여도를 고려하여 가중 평균한 조건부평균 스펙트럼과 가장 큰 기여도를 갖는 시나리오(M6.2~6.4, R=0~20 km)에 해당하는 조건부평균 스펙트럼을 함께 나타내었다. 가장 큰 기여도를 갖는 시나리오에 비하여 가중평균 스펙트럼이 상당히 낮음을 알 수 있으며, 이는 대표 시나리오의 기여도가 상대적으로 현저히 크지 않기 때문이다. 기여도가 가장 높은 조건부평균 스펙트럼은 10 Hz보다 높은 고진동수 영역에서 시나리오에 따라 등재해도 스펙트럼 보다 높은 스펙트럼 가속도를 가진다.

각 시나리오의 특성을 살펴보기 위해서 Fig. 5의 조건부평균 스펙트럼 가운데 진앙거리의 범위는 0~20 km로 동일하고 규모의 범위가 다른 세 가지 시나리오에 해당하는 것을 발췌하여 Fig. 6에 도시하였으며, 규모는 6.4~6.6으로 동일하고 진앙거리의 범위가 상이한 것을 발췌하여 Fig. 7에 도시하였다. 비교를 위해 Fig. 5의 대표 시나리오 CMS도 함께 도시하였다. 각각의 범례에서 괄호안의 숫자는 지진재해도 분해에서 얻어진 시나리오 별 기여도를 나타낸다. Fig. 6에서 규모의 차이는 2 Hz 미만의 상대적으로 낮은 진동수 영역에서 스펙트럼가속도의 큰 차이를 발생시키는 반면에 Fig. 7에서 진앙거리의 차이는 10 Hz 이상의 상대적으로 높은 진동수 영역에서 스펙트럼 가속도의 차이를 크게 유발한다. 함께 도시한 최대 기여도의 대표 시나리오가 13.6%의 기여도를 가지는 것과 비교할 때 Fig. 6 및 Fig. 7의 시

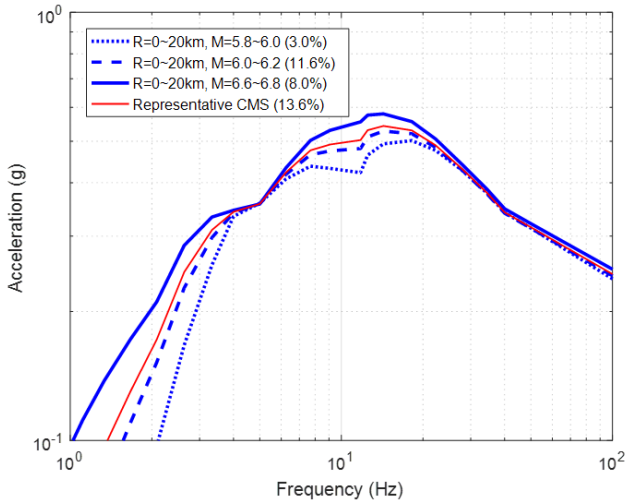


Fig. 6. CMS for different magnitude bins and R = 0~20 km ( $f_c = f_1$ )

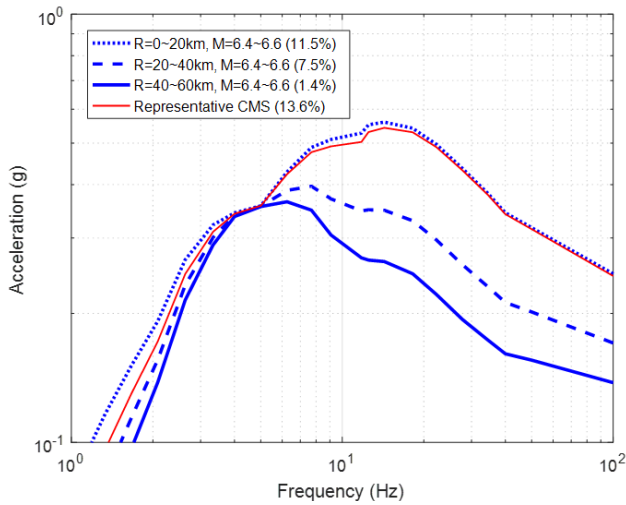


Fig. 7. CMS for different distance bins and M = 6.4~6.6 km ( $f_c = f_1$ )

나리오는 일부를 제외하면 상당한 수준의 기여도를 갖고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 대표 시나리오 이외의 시나리오에 대한 조건부평균 스펙트럼이 Fig. 5에 도시한 가중평균 조건부평균 스펙트럼의 수준을 단일 대표 시나리오에 대한 조건부평균 스펙트럼보다 상당히 낮추는데 기여하게 된다.

이하에서 단일시나리오 조건부평균 스펙트럼(single-scenario conditional mean spectrum, SCMS)과 다중시나리오 조건부평균 스펙트럼(multi-scenario conditional mean spectrum, MCMS)은 각각 지진재해분해에서 가장 큰 기여도를 갖는 시나리오에 의해 생성된 조건부평균 스펙트럼과 시나리오의 기여도에 기반하여 가중평균된 스펙트럼으로 정의한다. 제어 진동수가  $f_1/1.5$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  인 단일 시나리오 조건부평균 스펙트럼(single-scenario conditional mean spectrum, SCMS)을 SCMS1, SCMS2, SCMS3으로, 다중시나리오 조건부평균 스펙트럼(multi-scenario conditional mean spectrum, MCMS)은 각각 MCMS1, MCMS2, MCMS3으로 표기한다. 세 가지의 서로 다른 제어 진동수에 대한 SCMS와 MCMS를 각각 Fig. 8 및 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 8에서의 SCMS는 대표 시나리오가 M6.2~6.4, R=0~20 km로서 모두 동일하다. 동일 MCMS의 수준이 SCMS보다 전반적으로 낮음을 알 수 있다.

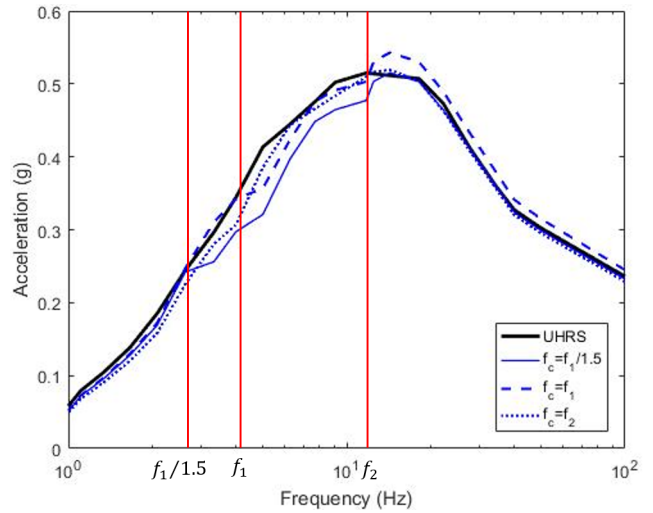


Fig. 8. SCMS for different control frequencies

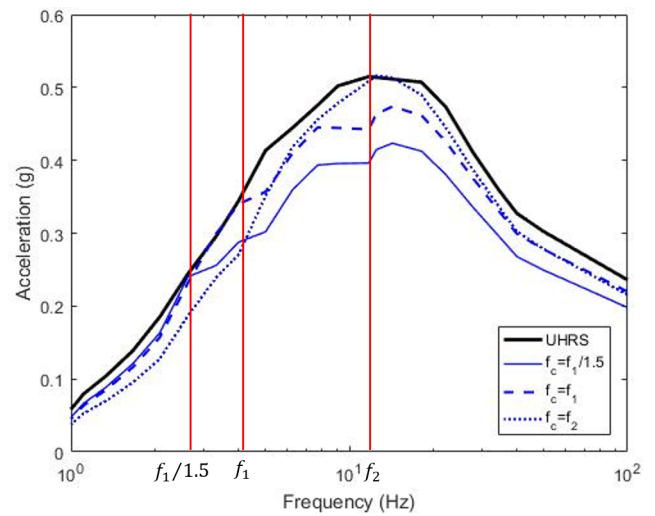


Fig. 9. MCMS for different control frequencies

Table 2. Base shear forces and overturning moments

Spectrum	Base shear (kN)	Overturning moment (kN-m)
UHRS	85,434	$3.82 \times 10^6$
SCMS1	74,303 (-13.0%)	$3.28 \times 10^6$ (-14.1%)
SCMS2	84,021 (-1.7%)	$3.73 \times 10^6$ (-2.4%)
SCMS3	78,081 (-8.6%)	$3.44 \times 10^6$ (-10%)
MCMS1	65,027 (-23.9%)	$2.91 \times 10^6$ (-23.8%)
MCMS2	76,919 (-10%)	$3.47 \times 10^6$ (-9.2%)
MCMS3	68,228 (-20.1%)	$2.93 \times 10^6$ (-23.2%)

UHRS, SCMS 및 MCMS를 기반으로 산정된 격납 구조물의 밀면전단력과 전도모멘트를 Table 2에 나타내었다. SCMS와 MCMS는 UHRS에 비하여 밀면전단력이 각각 13.0% 및 23.9%까지 감소하며, 전도모멘트도

유사한 경향을 나타낸다. 구조물의 강성 감소를 고려한  $f_c = f_1/1.5$ 를 제어 진동수로 선택한 경우에 1차모드 주기에서 스펙트럼가속도가 UHRS 대비 크게 감소하여 1차모드가 지배하는 대상 구조물의 특성상 가장 큰 응답감소를 타나낸다.

## 4. 지진취약도 분석

### 4.1 지진취약도 분석절차

격납구조물의 지진 취약도 분석은 응답스펙트럼 해석에 기초한 TR-103959[19]의 절차에 따라 평가하였다. 이 절차에서는 대상 구조물의 내진성능을 구조물이 한계상태에 도달하는 5% 감쇠비 스펙트럼가속도로 환산하여 나타낸다. 이와 같은 방식에 따른 구조물의 중앙값 스펙트럼가속도 성능은 식(1)에 의해 정의되며, 이는 비탄성 에너지 흡수량에 의한 구조물의 내진성능 증가를 고려한 것이다.

$$\overline{S_a} = F_s F_\mu S_a(f) \quad (1)$$

여기서 강도계수( $F_s$ )는 구조물이 탄성한계에 도달하는 스펙트럼 가속도로 환산하기 위한 기준 지진의 보정계수의 중앙값을 나타내며,  $F_\mu$ 는 비탄성 에너지흡수 계수,  $S_a$ 는 선형 탄성 지진 요구량을 나타낸다. 강도계수와 비탄성 에너지흡수 계수는 각각 식(2) 및 식(4)와 같다.

$$F_s = \frac{C - D_{NS}}{D_S + \Delta C_S} \quad (2)$$

여기서  $D_S$ 는 기준 지진에 대한 탄성 요구성능,  $\Delta C_S$ 는 지진 하중에 의한 구조물의 성능의 감소분,  $C$ 는 구조물 성능의 중앙값,  $D_{NS}$ 는 지진하중외의 요구성능을 나타낸다. 이 연구에서 내부 압력과 수직 지반운동은 고려하지 않았기 때문에  $D_{NS}$ 와  $\Delta C_S$ 는 0으로 가정하였다.

비탄성 에너지 흡수계수는 유효진동수/유효감쇠 (effective frequency/effective damping) 방법을 사용하여 계산 하였으며 연성계수( $\mu$ )를 구함으로써 산정할 수 있다[4]. 연성계수( $\mu$ )는 식(3)에 나타내었다.

$$\mu = \frac{\sum W_i \delta_{Ti}}{\sum W_i \delta_{ei}} \quad (3)$$

여기서  $W_i$  각 층의 중량을 나타내며,  $\delta_{Ti}$  각 층에서의 중앙값 최대 변위,  $\delta_{ei}$ 는 가장 취약한 층에서 항복에 도달할 때의 각 층에서의 중앙값 변위를 나타낸다.

비탄성 에너지 흡수계수 산정을 위한 격납 구조물의 중앙값 하중-변형 관계는 접선 전단강도와 변형각(drift)의 관계로 나타내며 한계상태를 나타내는 중앙값 최대변형각(극한변형)은 0.0075를 사용하였다. 중앙값 응력-변형률 관계는 Fig. 10과 같다. 격납 구조물의 극한강도는 Ogaki 등[20]이 제안한 원통형 콘크리트 벽체의 접선전단강도를 사용하였다. 항복강도는 ASME Boiler and Pressure Bessel Code[21]의 프리스트레스 격납 구조

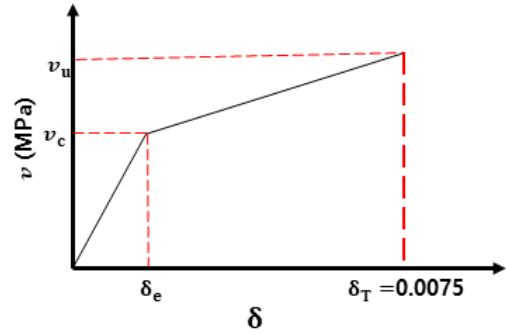


Fig 10. Median stress-strain relationship

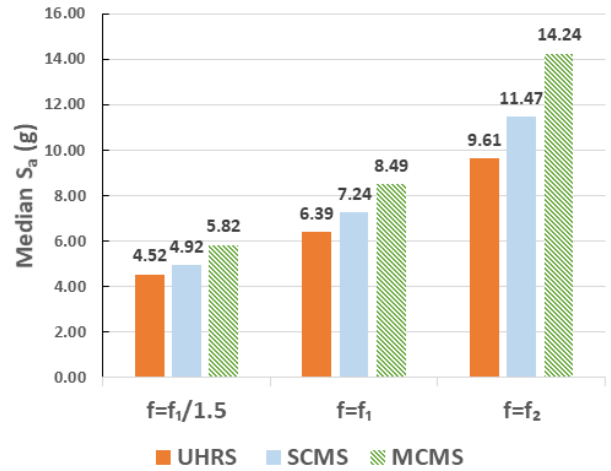


Fig. 11. Median spectral acceleration capacity

물 강도에서 콘크리트 부분의 강도를 사용하였다[4]. 유효고유진동수/유효 감쇠비 방법을 사용한 비탄성에너지 흡수계는 식(4)와 같이 계산된다.

$$F_\mu = \left( \frac{f_e/f}{f_s/f} \right)^2 \frac{S_a(f, \beta)}{S_a(f_e, \beta_e)} \quad (4)$$

여기서  $f_s/f$ 는 활선진동수와 탄성진동수의 비,  $f_e/f$ 는 유효진동수와 탄성진동수의 비,  $S_a(f, \beta)$ 는 탄성진동수 및 감쇠비에 따른 스펙트럼가속도,  $S_a(f_e, \beta_e)$ 는 유효진동수와 유효감쇠비에 따른 스펙트럼가속도를 나타낸다.

다양한 스펙트럼 별로 식(1)의 중앙값 스펙트럼 가속도를 산정한 결과는 Fig. 11과 같다. 모든 제어 진동수에서 UHRS와 비교했을 조건부평균 스펙트럼에 따른 중앙값 스펙트럼 가속도가 더 높게 나타난다. 이는 제어 진동수를 제외한 나머지 영역에서는 대체로 UHRS보다 낮아지는 조건부평균 스펙트럼 형상으로 인하여 밀면 전단력이 감소하고 강도계수가 증가하기 때문이다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9의 비교에서 예상할 수 있듯이 SCMS의 중앙값 스펙트럼 가속도 보다 MCMS의 중앙값 스펙트럼 가속도가 크게 나타난다.

### 4.2 대수표준편차 산정

식(1)로 표현되는 대상 구조물의 내진성능지표는 대수정규분포를 따르는 것으로 가정한다. 이 내진성능지표는  $F_s$  과  $F_\mu$  가 모두 지진요구(seismic demand)와 지진역량(seismic capacity)에 종속되어 있다. 따라서 무작위

**Table 3.** SCMS logarithmic standard deviations for demand parameters

Demand parameter			$\overline{S}_a$							
			UHRS		SCMS1		SCMS2		SCMS3	
Parameter	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$
Earthquake response spectrum shape	0.2	-	0.20	-	0.28	-	0.13	-	0.39	-
Horizontal direction peak response	0.12	-	0.10	-	0.10	-	0.10	-	0.10	-
Damping	-	0.05	-	0.11	-	0.11	-	0.11	-	0.11
Frequency	-	0.05	-	0.11	-	0.14	-	0.19	-	0.17
Mode shape	-	0.15	-	0.15	-	0.15	-	0.15	-	0.15
Torsion coupling	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05
Mode combination	0.10	-	0.10	-	0.10	-	0.10	-	0.10	-
Time history	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05
Ground motion incoherence	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05
SSI analysis	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05
Combined (SRSS)	-	-	0.25	0.24	0.32	0.25	0.19	0.28	0.42	0.27

**Table 4.** MCMS logarithmic standard deviations for demand parameters

Demand parameter			$\overline{S}_a$					
			MCMS1		MCMS2		MCMS3	
Parameter	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$
Earthquake response spectrum shape	0.2	-	0.29	-	0.13	-	0.40	-
Horizontal direction peak response	0.12	-	0.10	-	0.10	-	0.10	-
Damping	-	0.05	-	0.11	-	0.11	-	0.11
Frequency	-	0.05	-	0.09	-	0.14	-	0.08
Mode shape	-	0.15	-	0.15	-	0.15	-	0.15
Torsion coupling	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05
Mode combination	0.10	-	0.10	-	0.10	-	0.10	-
Time history	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05
Ground motion incoherence	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05
SSI analysis	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05
Combined (SRSS)	-	-	0.33	0.23	0.19	0.25	0.42	0.23

성(randomness)과 불확실성(uncertainty)에 따른 변동성을 고려한 표준 편차를 산정하여 지진취약도 곡선을 작성하고 고신뢰도 저파손확률(high confidence of low probability of failure, HCLPF) 역량을 산정한다.

이 절에서는 원전 격납 구조물에 대해 지진 요구 및 역량과 관련된 다양한 매개변수의 무작위성과 불확실성을 고려하여 대수표준편차를 평가한다. SCMS와 MCMS에 대한 요구와 역량 매개변수에 대한 대수표준편차를 Tables 3~6에 나타내었다. 여기서  $\beta_r$ 은 지진입력과 응답의 무작위성,  $\beta_u$ 는 지진입력과 구조물에 내재된 인식론적 불확실성에 기인한 스펙트럼 가속도 성능지표의 대수표준편차를 의미한다. Table 3과 Table 4에서 Earthquake response spectrum 항목의  $\beta_r$ 은 실지진과 스펙트럼형상의 무작위성에 따른  $\overline{S}_a$ 의 대수표준편차이다. UHRS에는 TR-103959에서 제시하고 있는 권장값인 0.2를 적용하였고 SCMS의 경우에는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 조건부 스펙트럼의 확률분포에 기초하여 산정하였다. MCMS는 개별 시나리오의 CMS에 대해서 SCMS와 동일한 방법으로 84.1 백분위수의 스펙트럼 값을 시나리오별 기여도에 기반하여 가중평균한 값을 전체 시나리오에 대한 84.1 백분위수 스펙트럼으로 보고 가중평균 중앙값 스펙트럼과 비교하여 대수표준편차를 산정하였다. UHRS에 대한 Earthquake res-

ponse spectrum에서  $\beta_r$ 은 기준값인 0.2에 기반하여 계산되지만 MCMS에 대한  $\beta_r$ 은 14~15개의 지진 시나리오에 대한 응답 스펙트럼 분석에 의해서 결정되며 시나리오의 가중치를 적용하여 결정된다. 따라서, 산정결과 Earthquake response spectrum에 대한 SCMS와 MCMS의  $\beta_r$ 은 거의 유사하나 UHRS의 권장치 0.2와는 상당한 차이를 갖는다. Vertical component response와 Earthquake component contribution 항에 대한  $\beta_u$  값은 수직지진을 고려하지 않았으므로 반영하지 않았다. 지진 역량과 관련하여 Model 항목의  $\beta_r$ 과  $\beta_u$ 는 각각 식 (5), 식 (6)에 의해서 산정되며 비탄성 변형의 증가에 따라 비탄성응답과 탄성모델에 응답의 편차가 커지게 됨을 나타낸다.

$$\beta_r = 0.4[0.06 + 0.03(F_\mu - 1)] \tag{5}$$

$$\beta_u = C_u(F_\mu - 1) \tag{6}$$

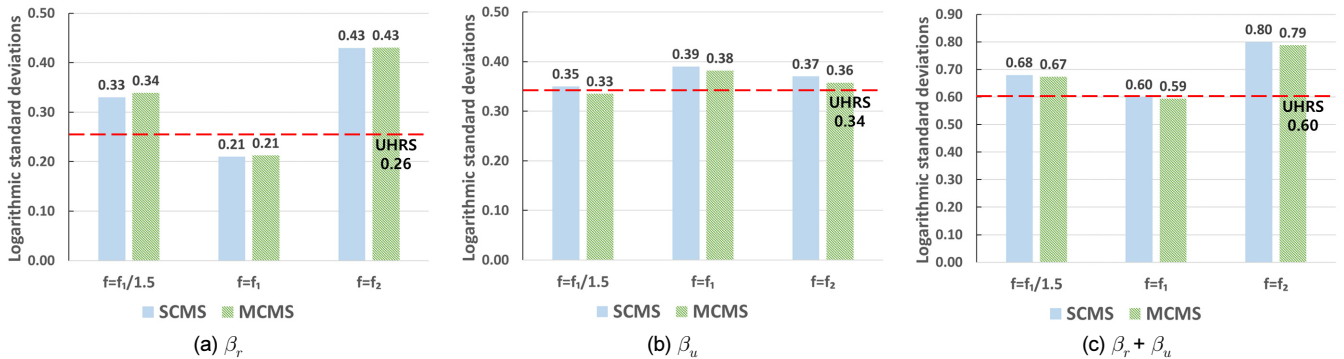
여기서  $C_u$ 는 보통 0.05에서 0.2 사이의 값을 사용하며[18], 이 연구에서는 0.1을 적용하였다.

**Table 5.** SCMS logarithmic standard deviations for capacity parameters

Capacity parameter			$\overline{S}_a$							
			UHRS		SCMS1		SCMS2		SCMS3	
Parameter	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$
Concrete compressive stress (including aging)	-	0.06 (0.10)	-	0.01	-	0.01	-	0.01	-	0.01
Steel reinforcement	-	0.10	-	0.07	-	0.08	-	0.07	-	0.07
Shear equation	-	0.20	-	0.09	-	0.10	-	0.09	-	0.09
Flexure equation	-	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-
Model	Eq. (5)	Eq. (6)	0.04	0.16	0.04	0.14	0.05	0.19	0.05	0.18
Drift	0.15	0.30	0.08	0.15	0.08	0.15	0.08	0.15	0.07	0.15
Combined (SRSS)	-	-	0.09	0.25	0.09	0.24	0.09	0.27	0.08	0.26

**Table 6.** MCMS logarithmic standard deviations for capacity parameters

Capacity parameter			$\overline{S}_a$					
			MCMS1		MCMS2		MCMS3	
Parameter	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$
Concrete compressive stress (including aging)	-	0.06 (0.10)	-	0.01	-	0.02	-	0.01
Steel reinforcement	-	0.10	-	0.07	-	0.07	-	0.07
Shear equation	-	0.20	-	0.09	-	0.09	-	0.09
Flexure equation	-	0.15	-	-	-	-	-	-
Model	Eq. (5)	Eq. (6)	0.04	0.15	0.05	0.21	0.05	0.20
Drift	0.15	0.30	0.08	0.14	0.08	0.16	0.08	0.15
Combined (SRSS)	-	-	0.09	0.25	0.09	0.29	0.09	0.28



**Fig. 12.** Combined logarithmic standard deviation

Table 3과 Table 4의 지진요구 매개변수 중에서 Earthquake response spectrum shape은 SCMS2 및 MCMS2의 경우를 제외하면 가장 큰 영향을 미치는 매개변수로 나타났다. SCMS2 및 MCMS2는 각각 Frequency 및 Mode shape이 가장 큰 영향을 미치는 매개변수로 나타났다. Table 5와 Table 6의 지진역량 매개변수별 대수표준편차는 각각 다른 스펙트럼 간의 값 차이가 크게 나타나지 않지만 Table 3과 Table 4에서 요구 매개변수별 대수표준편차는 항목에 따라서 스펙트럼간의 값 차이가 크게 나타나고 결과적으로 각 표의 마지막 항에 제시된 결합 대수표준편차의 차이도 크게 나타난다.

SCMS와 MCMS의 조합된 대수표준편차를 Fig. 12에 나타내었다. 각각의 스펙트럼에서 무작위성을 나타내는  $\beta_r$  과 불확실성을 나타내는  $\beta_u$  는 다중 시나리오 고려 여부에 따른 값 차이가 전체적으로 거의 나타나지 않는다.

### 4.3 지진 취약도 분석 결과

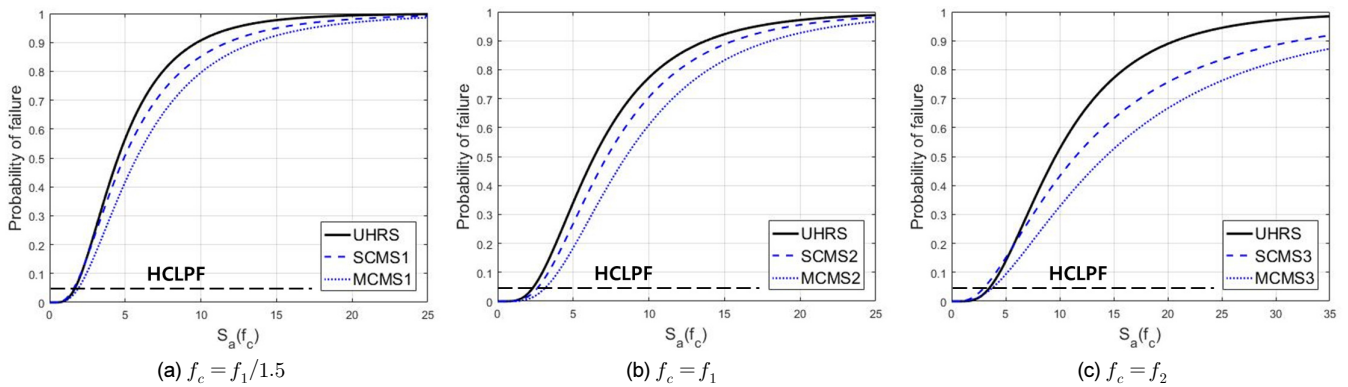
UHRS와 SCMS, MCMS 1~3의 중앙값 스펙트럼 가속도와 HCLPF 성능값을 Table 7에 나타내었다. HCLPF 성능은 95% 신뢰도 수준에서 5%의 파괴확률을 의미하며, 식 (7)에 의해 결정된다.

$$HCLPF_{50} = \overline{S}_a \cdot e^{-1.65(\beta_r + \beta_u)} \quad (7)$$

모든 스펙트럼의 중앙값 스펙트럼 가속도와 HCLPF 성능을 비교하기 위하여 각각의 제어 진동수에서 동일 제어 진동수를 사용하여 Table 7에

**Table 7.** Median and HCLPF spectral acceleration capacities

Control frequency, $f_c$			$f_c = f_1/1.5$	$f_c = f_1$	$f_c = f_2$
$S_a(f_c)(g)$			0.242	0.342	0.514
Median	$\bar{S}_a(f_c) (g)$	UHRS (A)	4.52	6.39	9.61
		MCMS (B)	5.82	8.49	14.24
		SCMS (C)	4.92	7.24	11.47
	Rate	$\{(B)-(A)\}/(A) \times 100 (\%)$	29	33	48
		$\{(C)-(A)\}/(A) \times 100 (\%)$	9	13	19
HCLPF50	$\bar{S}_a(f_c) (g)$	UHRS (D)	1.67	2.36	3.54
		MCMS (E)	1.92	3.19	3.88
		SCMS (F)	1.60	2.69	3.06
	Rate	$\{(E)-(D)\}/(D) \times 100 (\%)$	15	35	9
		$\{(F)-(D)\}/(D) \times 100 (\%)$	-4	14	-14



**Fig. 13.** Fragility curve for different response spectra

서 비교하였다. 이 표에서 스펙트럼가속도 성능은 제어진동수에서의 값이기 때문에 제어진동수가 달라지면 스펙트럼가속도 성능 사이의 단순 비교는 중요하지 않고 UHRS 대비 증가율이 중요하다. MCMS 중 MCMS3 ( $f_c = f_2$ )의 경우 중앙값 스펙트럼 가속도 값이 가장 높게 나타났으며 UHRS 대비 증가율 또한 48%로 가장 높게 나타났다. 그러나 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 MCMS3( $f_c = f_2$ )의 경우가 대수표준편차의 값도 가장 크게 나타나므로 결과적으로 HCLPF 성능의 증가율은 UHRS 대비 9%로 낮아지고 MCMS2( $f_c = f_1$ )가 UHRS 대비 35%의 증가율로 가장 높게 나타난다. 이는 구조물의 기존 진동수에서 스펙트럼 형상의 무작위성이 0이므로 대수표준편차가 가장 낮기 때문이다. SCMS의 경우 MCMS와 비교하였을 때 중앙값 스펙트럼 가속도 값이 낮게 나타나지만 그에 대한 대수표준편차는 MCMS와 유사한 수준이기 때문에 HCLPF 성능이 MCMS보다 낮아진다. 또한 SCMS2( $f_c = f_1$ )의 경우에만 UHRS보다 높게 나타난다. 따라서 조건부 스펙트럼에 기초하여 지진취약도 평가 시 적정 제어진동수는 구조물의 탁월 진동수를 선택하는 것이 불확실성을 가장 감소시킬 수 있으며, 단일 시나리오 보다는 다중 시나리오를 고려하는 것이 중앙값의 보수적 평가를 완화할 수 있다.

UHRS와 각각의 CMS의 취약도 곡선을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 전반적으로 조건부 스펙트럼을 적용하는 경우 파괴확률이 낮아지고 SCMS보다 MCMS가 더 낮은 지진취약도 곡선을 나타낸다. 그러나 SCMS1과 3의 경우 대수표준편차의 증가로 인해 기울기가 완만해지면서 HCLPF

성능이 위치한 낮은 스펙트럼가속도 영역에서 지진취약도 곡선이 UHRS에 의한 것과 겹치거나 교차하여 더 높은 파괴확률을 나타낸다. 따라서 내진 성능의 불확실성을 나타내는 대수표준편차의 증가를 억제하기 위해서는 탁월주기 중심의 제어진동수 선정이 중요함을 다시 한 번 확인할 수 있다.

### 5. 결론

이 연구에서는 원전 격납구조물의 SPRA를 위해서 기존에 사용하던 UHRS 대신 지진제해도 분해를 통하여 선정된 시나리오에 기초한 조건부 평균 스펙트럼을 적용하였다. 단일 최대기여 시나리오에 기초한 SCMS와 일정 수준 이상의 기여도를 갖는 다중시나리오에 기초한 MCMS를 도출하여 지진취약도 평가를 수행하였으며 기존의 UHRS에 의한 평가결과와 중앙값 및 HCLPF 성능을 비교하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 조건부평균 스펙트럼은 제어진동수를 제외한 영역에서 대체로 UHRS보다 낮아지며, SCMS보다 MCMS의 감소폭이 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 단일 시나리오가 지배적이지 않는 한 합리적 지진취약도 평가를 위해서 다중 지진 시나리오의 기여를 고려할 필요가 있다.
- 2) 조건부평균 스펙트럼에 대한 탄성응답스펙트럼을 수행함으로써 UHRS에 비하여 밀면전단력이 2~24% 감소하며, 탁월진동수를 제어 진동수로



선정하는 경우에 가장 보수적인 값을 얻는다.

- 3) 조건부평균 스펙트럼을 적용함으로써 중앙값 스펙트럼가속도 성능은 UHRS 대비 9~48% 증가한다. 이는 응답스펙트럼의 감소에 의한 것으로서 다중시나리오를 선정함으로써 상대적으로 더 큰 폭의 증가가 나타난다.
- 4) 조건부평균 스펙트럼을 적용함으로써 스펙트럼가속도의 HCLPF 성능은 UHRS 대비 14~35% 증가한다. 증가율이 중앙값 성능보다 감소하는 것은 스펙트럼 형상 항목의 대수표준편차가 증가하는 것이 가장 큰 영향요인이다. 이 대수표준편차는 탁월진동수를 제어진동수로 선정시 가장 낮아지고 HCLPF 성능은 가장 높게 나타난다.
- 5) 진동주기별 스펙트럼가속도의 상관관계를 합리적으로 나타내지만 지진 시나리오 및 제어진동수 선정에 있어서 자유도를 갖는 조건부평균 응답 스펙트럼을 지진취약도 평가에 적용 시 지진재해도에 기여하는 다양한 시나리오를 반영하고 지진응답에 가장 크게 기여하는 모드를 제어진동수로 선정하는 경우에 확률론적 불확실성을 저감한 보다 합리적인 평가 결과를 얻을 수 있다.

## / 감사의 글 /

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20171510101960).

## / REFERENCES /

1. Kim MK, Choi IK, Effect of Evaluation Response Spectrum on the Seismic Risk of Structure, Earthquake Engineering Society of Korea, 2009 Dec;13(6):39-46.
2. Hahm D, Seo JM, Choi IK, Rhee HM, Uniform Hazard Spectrum Evaluation Method for Nuclear Power Plants on Soil Sites based on the Hazard Spectra of Bedrock Sites, Earthquake Engineering Society of Korea, 2012 Jun;16(3):35-42.
3. Choi IK, Choun YS, Ahn SM, Seo JM, Probabilistic seismic risk analysis of CANDU containment structure near-fault earthquakes, Korea Atomic Energy Research Institute, Republic of Korea, 2008 Jun;238(6):1382-1391.
4. Choi IK, Seo JM, Inelastic Energy Absorption Factor for the Seismic Probabilistic Risk Assessment of NPP Containment Structure, Earthquake Engineering Society of Korea, 2001 Oct;5(5):47-56.
5. Cho SG, Joe YH, Seismic fragility analyses of nuclear power plant structures based on the recorded earthquake data in Korea, Korea Atomic Energy Research Institute, Republic of Korea, 2005 Aug; 235(17-19):1867-1874.
6. Joe YH, Cho SG, Seismic Fragility Analysis of Multi-Modes Structures Considerin Modal Contribution Factor, Earthquake Engineering Society of Korea, 2002 Aug;6(4):15-22.
7. Choi IK, Ahn SM, Choun YS, Seismic Fragility Analysis of PSC Containment Building by Nonlinear Anaysis, Earthquake Engineering Society of Korea, 2006 Feb;10(1):63-74.

8. Baker JW, Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection, Journal of Structural Engineering, 2011 Mar;137(3): 322-331.
9. Renault P, PEGASOS refinement project: new findings and challenges from a PSHA for Swiss Nuclear Power Plants, Transactions, SMiRT 21, 2011 Nov;Div-IV:Paper ID# 561.
10. Haselton CB, Baker JW, Stewart JP, Whittaker AS, Luco N, Fry A, Hamburger RO, Zimmerman RB, Hooper JD, Charney FA, Pekelnicky RG, Response History Analysis for the Design of New Buildings in the NEHRP provisions and ASCE/SEI 7 Standard: part I - overviwe and Specification of Ground Motions, Earthquake Engineering Research Institute, 2017 May;33(2):373-395.
11. Haselton CB, Fry A, Hamburger RO, Baker JW, Zimmerman RB, Luco N, Elwood KJ, Hooper JD, Charney FA, Pekelinicky RG, Whittaker AS, Response History Analysis for the Design of New Buildings in the NEHRP Provisions and ASCD/SEI 7 Standard:Part II-Structural Aanlysis Procedures and Acceptance Criteria, Earthquake Engineering Research Institute, 2017 May;33(2):397-417.
12. Zimmerman RB, Baker JW, Hooper JD, Bono S, Haselton CB, Engel A, Hamburger RO, Celikbas A, Jalalian A, Response History Analysis for the Design of New Buildings in the NEHRP Provisions and ASCD/SEI 7 Standard : Part III - Example Applications Illustrating the Recommended Methodology, Earthquake Engineering Research Institute, 2017 May;33(2):419-447.
13. Jarrett JA, Zimmerman RB, Charney FA, Jalalian A, Response-History Analysis for the Design of New Buildings in the NEHRP Provisions and ASCE/SEI 7 Sthandard: Part IV-A Study of Assump-tions, Earthquake Engineering Research Institute, 2017 May;33(2): 449-468.
14. ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Creteria for Buildings and other Structures, c2017.
15. Korea Electrical Power Corporation, Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD, APRI400 DESIGN CONTROL DOCUMENT TIER2, APRI400-K-X-FS-14002-NP REVISION 0, Republic of Korea, c2014.
16. Regulatory guide 1.208, a perfomance-based approuch to define the site-specific earthquake ground motion, U,S, Nuclear Regulatory Commission, c2007.
17. Atkinson GM, Boore DM, Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America, Bulletin of the Seismological Society of America, 2006; 96(6):2181-2205.
18. Jayaram N, Lin T, Baker JW, A Computationally Efficient Ground-Motion Selection Algorithm for Matching a Target Response Spectrum Mean and Variance, Earthquake Spectra, 2011 Aug; 27(3):797-815.
19. Reed JW, Kennedy RP, Methodology for developing seismic fragilities, EPRI TR-103959, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, c1994.
20. Ogaki Y, Kobayashi M, Takeda T, Yamaguchi T, Yoshizaki K, Sugano S, Shear strength tests of prestressed concrete containment vessels, SMiRT-6, 1981;13(22)J4/3.
21. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Division 2, Code for Concrete Containments, c2015.