2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

확률론적 지진재해도를 이용한 등신뢰도 스펙트럼 작성

Development of Uniform Reliability Spectrum Based on the Probabilistic Seismic Hazard

최인길, 전영선, 서정문
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

연관희
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원전 구조물 및 기기의 내진설계를 위해서는 설계지진의 설정이 필요하다. 우리나라에서는 설계지진으로 미국 NRC에서 제시한 표준응답스펙트럼을 사용하여 왔으나 최근 지진재해도 분석이 일반화되면서 이를 이용한 부지 고유의 설계응답 스펙트럼 작성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 기존 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석 결과를 이용하여 등재해도 스펙트럼을 작성하고 이를 이용하여 등신뢰도 스펙트럼을 작성하였다. 등신뢰도 스펙트럼은 모든 부지 및 시설에 대해 일관성 있는 안전성을 확보하는데 필요하며 본 연구에서 시범적으로 작성한 등신뢰도 스펙트럼은 우리나라 원전부지의 등신뢰도 스펙트럼의 형상을 추정하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

ABSTRACT

It is necessary to define the design earthquake for the design of nuclear power plant structures and equipments. The standard response spectrum of US NRC regulatory Guide 1.60 have been used for the design of Korean nuclear power plants. The probabilistic seismic hazard analyses(PSHA) for the nuclear power plant sites were performed for the probabilistic seismic risk assessment. It is required to develop the site specific design response spectra based on the PSHA results. In this study, the uniform reliability spectrum for a plant site was developed using the existing PSHA results. The uniform reliability spectrum can be used for achieving seismic risk consistency of NPP components across sites. The example uniform reliability spectrum developed in this study will give useful information to predict the spectral characteristics of Korean NPP sites.

1. 서론

원전 구조물 및 시설의 내진설계 및 내진성능 평가를 위해서는 설계응답스펙트럼 또는 평가용 응답스펙트럼의 설정이 필요하다. 우리나라에서는 원전의 내진설계에 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 제시한 표준응답스펙트럼[1]을 사용하여 왔다. 그러나 이 표준응답스펙트럼은 미국 서부 지역에서 발생한 강진기록을 토대로 작성된 것으로 우리나라의 지진특성이나 지반특성을 적절히 나타내지 못한다. 또한 미국 서부지역의 지진기록을 이용하여 작성하였으므로 미국 중동부 지역에도 적용하는데 많은 문제점이 있다[2,3]. 이와 같은 이유로 미국 NRC에서는 확률론적 지진재해도의 재분해(De-aggregation)를 통하여 통제지진(Controlling Earthquake)을 산정하고 이를 이용하여 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake; SSE)을 결정하는 방법을 Regulatory Guide 1.165[4]에서 제안하였다.

그러나 이 지침에서는 안전정지지진의 결정방법만을 제시하고 있으며 실제 통제지진의 스펙트럼을 결정하는 방법에 대해서는 제안하고 있지 않다. 미국 NRC에서는 통제지진에 대한 스펙트럼 형상 결정을 위한 연구를 수행하고 미국 서부 및 중동부 지역에 적합한 경험적 및 반 경험적 스펙트럼 형상식을 제시하였다[3]. 또한 임의 부지 및 시설에 대해 일관성 있는 내진안전율을 확보하기 위해 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum; UHS) 작성 및 등신뢰도 스펙트럼(Uniform Reliability Spectrum; URS) 작성 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 우리나라 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도 결과를 이용하여 UHS 및 URS를 작성하였다. 본 연구에 사용된 확률론적 지진재해도 분석 결과는 과거 본 연구진에 의해 수행된 것으로 최신의 기술이나 지식이 모두 반영된 것이라고 할 수 는 없으나 비교적 근래의 결과를 포함하고 있으며 우리나라 원전부지의 UHS 및 URS의 형상을 추정하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 위험도기반 설계

지진지반운동에 대한 기준 개발의 목적에는 서로 다른 부지 및 부지 조건에서 일관성(Consistency)을 확보하기 위한 것이 포함된다. 여기서 일관성이라는 말의 의미는 제안된 지반진동이 원전 시설이 어느 부지에 위치하더라도 지진으로 인한 파괴로부터 동일한 수준의 안전도를 확보할 수 있다는 것을 의미한다.

내진안전성에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있다. 첫 번째는 큰 지진이 얼마나 자주 발생하는 지에 대한 지진재해도 수준을 들 수 있다. 두 번째로는 이러한 빈도가 지진재해도 곡선의 경사로 나타나는 지반운동 크기에 따라 어떻게 변하는가 하는 것이다. 이 경사는 특정 성분의 고유주기 뿐 아니라 지진환경에 따라 달라진다. 세 번째 인자로는 시설의 부품과 관련된 것으로 이들이 지진의 진동에 얼마나 강하며 얼마나 이를 확신하고 있는가 하는 것이다.

위험도기반 내진설계기준을 개발하기 위해서는 다음의 4가지 사항을 고려하여야 한다[5].

(1) 지진에 의한 비허용성능의 년간확률 목표값
(2) 최소의 내진여유도
(3) (1)과 (2)가 결정된 상태에서 어느 정도의 년초과빈도로 안전정지지진을 설정할 것인가
(4) (2)에서 설정된 내진여유도를 확보하기 위한 내진설계기준

첫 번째 사항은 순전히 정책적인 결정에 따른 것이다. 두 번째와 세 번째 사항은 종합적으로 서로 상호 연관되어 있으므로 두 사항에 대한 응답의 다양한 조합을 첫 번째 사항을 만족시키기 위해 사용할 수 있다.

미국 NRC에서는 모든 원전은 발전소의 내진여유도를 HCLPF 내진성능으로 평가하도록 하였다[6]. 따라서 SSE(Safe Shutdown Earthquake)에 대한 내진여유도는 HCLPF와 SSE 지반운동 수준의 비로 정의할 수 있다. 또한 NRC에서는 SSE 지반운동 응답스펙트럼을 년초과확률에 근거하여 설정하였다[4].

위험도기반 내진설계기준은 다음에 의해 설정한다.

(1) 안전에 관련된 주요 구조물 및 기기에 대한 지진에 의한 파괴확률 목표값 설정.
(2) 요구되는 HCLPF 내진여유도를 확보하기 위한 내진응답 및 성능기준 설정.
(3) 규정한 HCLPF 내진여유도 및 지반운동비에 따른 확률비 R_P 결정.
(4) 초과빈도 H_{SSE}에서의 SSE 지반운동 수준 결정.

이러한 방법에 따라 US DOE에서는 DOE 시설에 대한 위험도기반 내진설계 및 평가기준을 DOS-STD-1020-94[7]에서 채택하였다.

3. 등신뢰도 스펙트럼

원전 설계 및 평가에 활용하기에 적합한 지진 지반운동 스펙트럼 작성기법은 McGuire 등의 연구[3]에 잘 나타나 있으며 이를 요약하여 나타내면 다음의 그림 1과 같다. 그림 1은 암반지반에 대한 지반운동 스펙트럼을 작성하는 절차를 보여주고 있다.

원전 부품의 파괴빈도로 나타나는 URS는 각 진동수에서 재해도곡선의 경사를 반영함으로써 확보할 수 있다. 이러한 재해도곡선의 경사는 10^{-4} UHS에 대한 설계와 같이 큰 지반운동의 빈도에 영향을 미치므로 매우 중요하다. 일정한 부품의 파괴빈도를 확보하기 위한 설계를 위해서는 10^{-4}～10^{-5} 재해도에서의 경사를 기준으로 암반상의 UHS를 수정하는 것이 바람직하다.

UHS로부터 URS를 유도하는 방법은 세 가지 지반운동 변수 즉, PGA, 10Hz 및 1Hz에서의 스펙트럴 가속도를 사용하여 미국 전역에 걸친 11개 부지에 대해 참고문헌[6]에서 보여주었다. 이 보고서에서 URS를 사용함으로서 플랜트 부품의 파괴빈도 범위는 모든 부지 및 변수에 대해 계수(Factor)를 20에서 3으로 감소시켰다. 나머지 계수 3은 다른 부품 파괴에서의 불확실성에 기인하는 것으로 현재의 설계 절차에서는 줄일 수 없는 것이다.

URS를 얻기 위한 UHS의 수정은 설계에서 선정된 재해도 수준(예로 10^{-4})에 따라 달

라지며 설계 코드 및 가이드에 관련된 보수성의 결정론적 수준(예로 설계운동에 대해 1.67 사용)에 따라 달라진다.

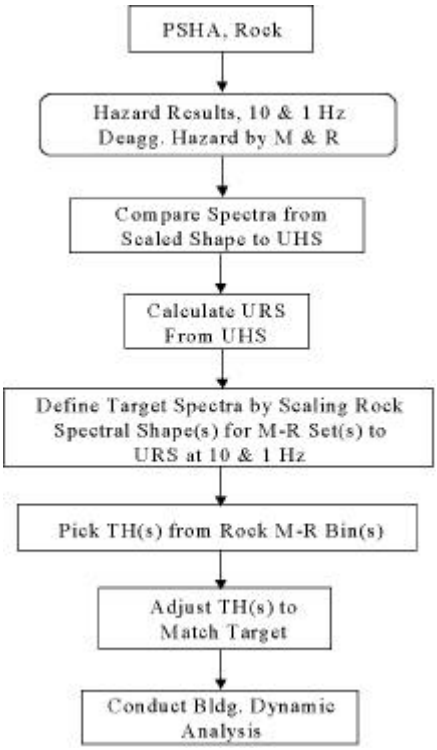


그림 1. 설계지반운동 결정 절차

확률론적 지진재해도 곡선으로부터 UHS를 작성하고 이를 수정하여 URS를 작성하는 방법에 대해 간략히 기술한다. 이 방법은 McGuire 등[3]에 의해 개발된 방법이며 이를 적용하여 미국 내 11개 부지에 대해 URS를 작성하여 그 타당성을 검토한 바 있다[6].

먼저 확률론적 지진재해도 분석 결과로부터 얻은 재해도곡선을 이용하여 10^{-4} 및 10^{-5} 평균 UHS를 작성한다. 이들 스펙트럼으로부터 각각의 진동수 f에서의 스펙트럴 진폭의 비 $A_R(f)$를 결정한다. 즉,

$$A_R(f) = SA(f, 10^{-5}) / SA(f, 10^{-4}) \tag{1}$$

여기서 SA는 스펙트럴 가속도를 나타낸다. 경사도를 나타내기 위해 필요한 추가적인 변수로는 K_H가 필요하며 이는 대수공간에서 재해도곡선의 부(Negative) 경사이다. 이들 둘은 서로 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$A_R = 10^{\frac{1}{K_H}} \quad or \quad K_H = \frac{1}{\log_{10} A_R} \tag{2}$$

URS는 각 진동수에서 산정된 스케일계수 SF를 원래의 UHS에 곱하여 구할 수 있다. 즉,

$$URS = UHS \times SF \tag{3}$$

스케일계수 SF는 정책적인 그리고 결정적인 다음과 같은 두 변수에 따라 달라지게 된다.

1) 소요의 확률비 R_P : UHS가 결정된 재해도 초과빈도 H_D와 구조물, 시스템 및 부품의 파괴확률 P_f의 비로 정의되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_P = \frac{H_D}{P_f} \tag{4}$$

2) 소요의 최소 내진여유도 계수 F_{SM} : SRP, 특정 코드 및 기준(ACI, AISC, ASME 등)에 따라 설계된 구조물, 계통 및 부품에 대해 확보되는 값으로 다음의 식으로 정의한다.

$$F_{SM} = \frac{HCLPF\ \ Capacity}{URS} \tag{5}$$

여기서 HCLPF 성능은 개략 평균 1% 파괴확률에 상응하는 지반운동 수준이다.

신뢰도기반 설계를 이루기 위해서는 규제기관에서 이들 두 변수 R_P 및 F_{SM}의 목표값을 설정하여야 한다. 현재의 코드 및 기준은 SRP(Standard Review Plan)와 연관되어 있으며, SRP에서는 최소 내진여유도계수 F_{SM}이 1.0～2.0이 되며 이 값에서 작은 쪽의 반은 취성파괴모드에 적용할 수 있는 범위이며 큰 쪽 반은 연성파괴모드에 적용할 수 있는 값이다.

신뢰도기반 설계를 이루기 위해서는 이들 두 변수 R_P 및 F_{SM}의 목표값을 설정하여야 한다. 현재의 코드 및 기준은 SRP와 연관되어 있으며, SRP에서는 최소 내진여유도계수 F_{SM}이 1.0～2.0이 되며 이 값에서 작은 쪽은 취성파괴모드에 적용할 수 있는 범위이며 큰 쪽은 연성파괴모드에 적용할 수 있는 값이다.

3.2 등신뢰도 스펙트럼의 활용

URS는 두 가지 용도로 사용될 수 있다. 하나는 UHS에 대한 일관성 검토이며 나머지 하나는 URS로부터 다중 설계지진 스펙트럼의 작성에 사용된다. 일관성 검토를 위해

10Hz 및 1Hz에서 10^{-4}의 재분해로부터 얻은 적절한 평균 M-R 값을 사용한다. 이는 PSHA에서 사용된 감쇄식 및 부지에 적합한 스펙트럼 형상식으로부터 스펙트럼 형상을 산정하는데 사용된다. 이는 10Hz 스펙트럼 형상 산정을 위해서는 10Hz에 대한 M-R 재분해 값을 사용하였으며 1Hz에 대해서도 마찬가지이다. 감쇄식으로부터는 PSHA에서 사용한 가중치를 준 감쇄식을 사용하여 대표적인 스펙트럼 형상을 산정한다. 대표적인 스펙트럼 형상은 각 감쇄식으로부터의 가중치가 부여된 대수 스펙트럴 값의 평균의 반대수 값으로 산정된다. 이들 대표적인 스펙트럼 형상은 10Hz 및 1Hz에서 10^{-4} UHS와 동일하게 스케일링한다.

스펙트럼 형상은 또한 McGuire 등[3]에 의해 제안된 형상식 등을 이용하여 10^{-4} 재해도에서의 10Hz 및 1Hz에서의 재분해 결과로부터 얻은 평균 M-R 에 대해 작성할 수 있다. 이들 스펙트럼 형상은 10Hz와 1Hz에서 10^{-4} UHS와 동일하게 스케일링한다.

URS의 두 번째 용도는 각각의 지진에 대한 설계스펙트럼을 작성이다. 설계자가 선택할 수 있는 하나의 옵션은 광역화된 10^{-4} URS를 설계에 사용하는 것으로 이 경우 스펙트럼을 URS로 스케일링 할 필요가 없다. 그러나 설계자가 이러한 광역화한 스펙트럼을 사용하기 원하지 않을 수 있다. 이 경우 감쇄식으로부터 작성된 대표적인 스펙트럼 형상을 10Hz 및 1Hz에서 10^{-4} URS로 스케일링하여 사용한다. 이 경우에 대해서는 PSHA에서 사용한 감쇄식으로부터 작성한 대표적인 스펙트럼 형상만을 사용한다. 이는 이 스펙트럼 형상이 가장 최근에 확립된 스펙트럼이기 때문이다. 두 스케일 된 스펙트럼은 모든 진동수에서 URS에 비해 10% 이상 떨어지진 않아야 한다. 10Hz 스케일 된 스펙트럼이 10Hz 이상의 진동수 구간에서 URS에 비해 10% 이상 떨어질 경우 10% 기준에 만족할 때까지 10Hz 스케일링된 스펙트럼을 증가시킨다. 다른 방법으로는 가장 차이가 크게 나는 진동수에 대해 추가적인 스케일 된 스펙트럼을 추가하는 방법이 있으며 이 때 이 진동수에서의 재해도 재분해를 통해 M-R을 결정하고 스펙트럼 형상을 산정한다. 1Hz 이하의 진동수 구간에서도 10% 이상의 차이가 발생하는 진동수에 대해 유사한 방법을 적용할 수 있다. 10Hz와 1Hz 사이의 구간에 대해서는 두 스케일 된 스펙트럼의 포괄 스펙트럼이 URS 보다 10% 이상 떨어지는 경우 두 스펙트럼을 10% 법칙을 만족하도록 동일한 비율로 증가시켜야 한다. 대안으로 스펙트럼 형상을 산정하기 위해 이 진동수에서 재해도를 재분해 한 결과로부터의 M-R 값을 사용하여 최대 차이가 발생하는 진동수에서 추가적인 스펙트럼을 스케일 할 수 있다. 10% 기준을 적용하기 위해 PSHA는 최소 25개의 진동수에서 수행하여야 하며 이 때 100Hz와 0.2Hz 사이의 대수축에서 개략적으로 동일한 간격으로 한다.

3.3 수직 설계응답 스펙트럼

수직 설계스펙트럼은 V/H 비를 이용하여 수평 설계스펙트럼을 작성하거나 수평운동과는 별도로 수직 운동에 대한 PSHA를 수행하는 방법이 있다. 이 경우 수평운동에 대한 절차를 동일하게 따른다. 일단 수직방향 설계스펙트럼이 정해지면 일관성 있는 운동이 추출되었는지를 확인하게 위해 수평운동과 비교하여야 한다.

4. 등신뢰도 스펙트럼 작성 예

4.1 확률론적 지진재해도 분석

국내 원전부지에 대한 지진재해도 분석은 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)방법에 따라 수행되었다. 지진재해도 입력자료의 도출을 위해 4개의 전문가 팀을 구성하였으며 각 팀별로 지진학자, 지구물리학자 및 구조지질학자의 3인으로 구성하였다. 감쇄식 평가에는 전문가 1인을 선정 다른 전문가의 자문을 포함하여 다수의 감쇄식을 제공하도록 하였다[8]. 지진재해도 해석에 사용 가능한 입력자료를 도출하기 위하여 질의서를 작성하여 그 결과를 제공받는 형식을 취했다.

전문가 팀에 의해 작성된 지진재해도 입력자료 및 지반운동 감쇄식을 이용하여 원전부지에 대한 평균 지진재해도 곡선을 EPRI 방법을 적용하여 시범적으로 작성하였다. 원전부지의 지진재해도 곡선은 그림 2와 같다. 그림에서는 원전 부지의 평균 PGA(Peak Ground Acceleration) 및 스펙트럴 재해도곡선 (Spectral Hazard Curves)을 보여주고 있다.

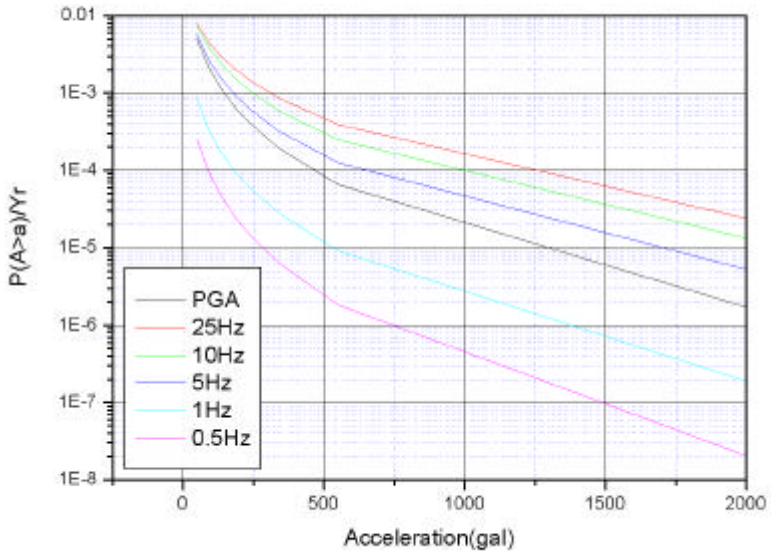


그림 2. 확률론적 지진재해도 분석에 의한 평균 지진재해도곡선

4.2 UHS 및 URS 작성

먼저 스펙트럴 진폭비 A_R을 결정하기 위해 앞에서 구한 10^{-4} 및 10^{-5} 평균 UHS로부터 각 진동수에서의 스펙트럴 가속도를 산정한다. 표 1에 UHS로부터 구한 각 진동수에서의 스펙트럴 가속도를 보여주고 있다. 이 값들을 이용하여 식 (1)로부터 A_R 값을 구

하였으며 그 값을 표 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 A_R값은 1.94～3.23의 범위에 있으며 25Hz에서 가장 작은 값을 나타내며 25Hz를 기준으로 양측으로 점차 증가하는 것을 알 수 있다.

산정된 A_R값을 이용하여 지진재해도 곡선의 경사도 K_H를 산정하였으며 그 값을 표 1에 같이 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 지진재해도 곡선의 경사도는 1.95～3.36의 값을 갖는 것으로 나타났다. 미국 중동부지역에 대해 평균초과빈도 10^{-4}～10^{-5} 범위에서 스펙트럴 가속도 지반운동의 A_R비와 캘리포니아 및 기타 근접한 활성단층에 의해 지배적인 영향을 받는 강진지역에서는 A_R비의 전형적인 값은 다음의 표 2와 같다.

우리나라 원전부지에서의 재해도 결과로부터 산정한 재해도곡선의 경사는 5～10Hz 범위에서는 미국 중동부지역에서의 재해도곡선과 동일한 양상을 보여주고 있으나 1Hz에서의 경사도는 미국 중동부지역에 비해 약간 작은 값을 보여주고 있다.

표 1. 재해도곡선으로부터 구한 국내 원전부지의 A_R, K_H 및 SF

	100Hz*	50Hz*	25Hz	10Hz	5Hz	1Hz	0.5Hz
SA(10^{-4})	467.29	467.29	1257.93	1001.69	650.19	179.61	87.21
SA(10^{-5})	1302.71	1302.71	2445.49	2089.54	1705.65	532.07	282.49
A_R	2.78	2.78	1.94	2.08	2.62	2.96	3.23
K_H	2.24	2.24	3.46	3.13	2.38	2.12	1.95
SF	1.19	1.19	0.77	0.84	1.11	1.28	1.43

* 50Hz 및 100Hz에 대한 감쇄식이 주어지지 않아 PGA에 대한 값을 사용.

표 2. 미국 중동부 및 서부지역에서의 A_R비[6]

A_R	Frequency(Hz)	
	5～10	1
CEUS	2.0～4.0	3.0～6.0
California	1.5～2.0	2.0～3.0

URS를 작성하기 위해서는 UHS를 스케일링 할 수 있는 스케일계수를 구하여야 한다. 먼저 R_P의 값이 20～40의 범위에 있고 F_{SM}을 1.67로 가정했을 때의 SF값을 표 1에서 보여주고 있다. 표에서 보는바와 같이 10～25Hz 구간에서는 UHS에 비해 URS가 감소하며 저진동수 및 고진동수 구간으로 갈수록 URS가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한 R_P가 10～20의 범위에 있을 때의 URS를 그림 3에 같이 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 R_P가 10～20의 범위에 있을 경우에는 전 진동수 구간에 걸쳐 UHS 보다 URS가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

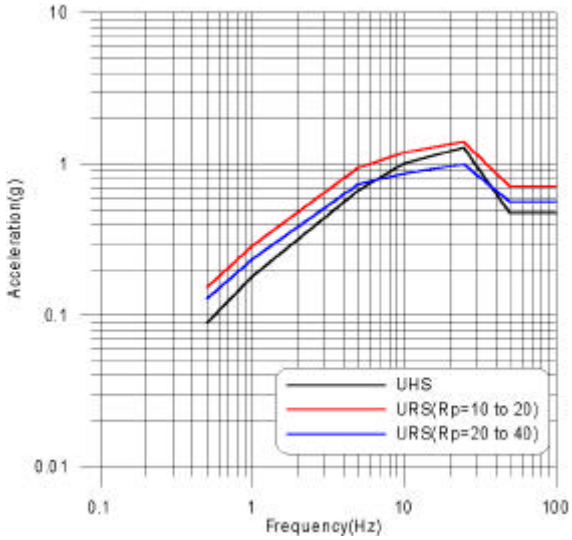
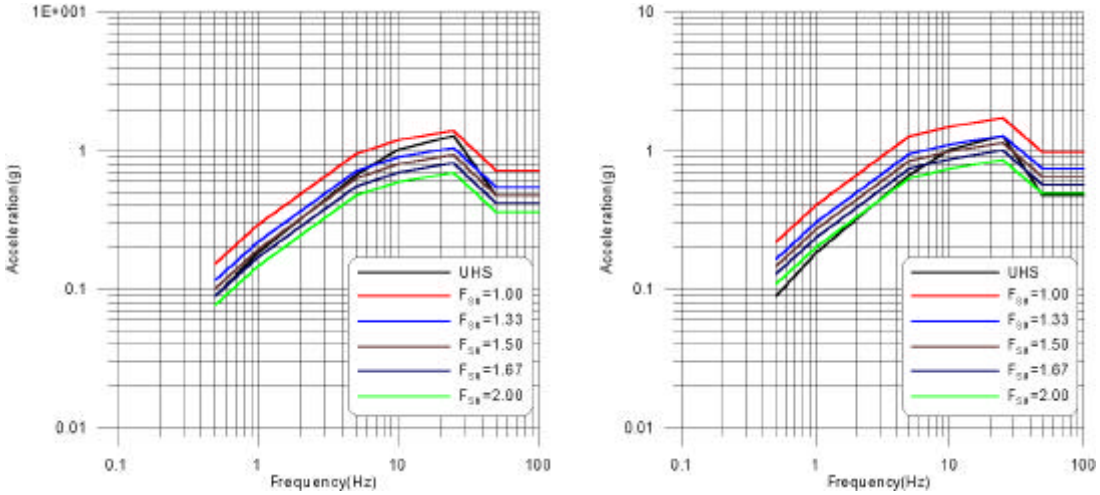


그림 3. 국내 원전부지에 대한 UHS와 URS 비교(F_{SM} =1.67)

그림 4에서는 R_P 및 F_{SM}의 값에 따른 URS 형상을 UHS와 함께 비교하여 보여주고 있다. 이때 SF 값은 표 3에서 제시된 식을 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 F_{SM} 값이 작을수록 스펙트럴 가속도가 대체적으로 증가하는 양상을 보여주고 있으며 저진동수 및 고진동수 구간에서 UHS에 비해 URS가 증폭되는 경향을 보여주고 있다.



(a) R_P =10～20일 때 (b) R_P =20～40일 때

그림 4. R_P 및 F_{SM}의 값에 따른 URS 형상

표 3. R_P 및 F_{SM}에 따른 SF 값[6]

F_{SM}	Desired R_P Range	
	10 to 20	20 to 40
1.0	$\max\{1.0, .60A_R^{0.9}\}$	$\max\{1.2, .60A_R^{1.2}\}$
1.33	$\max\{0.8, .45A_R^{0.9}\}$	$\max\{0.9, .45A_R^{1.2}\}$
1.5	$\max\{0.7, .40A_R^{0.9}\}$	$\max\{0.8, .40A_R^{1.2}\}$
1.67	$\max\{0.6, .35A_R^{0.9}\}$	$\max\{0.7, .35A_R^{1.2}\}$
2.0	$\max\{0.5, .30A_R^{0.9}\}$	$\max\{0.6, .30A_R^{1.2}\}$

5. 결론

본 연구에서는 국내 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도 결과를 이용하여 UHS 및 URS를 작성하여 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 국내 원전부지에 대한 지진재해도 곡선의 경사도는 1.95～3.36로 나타났으며 대체적으로 미국 중동부 지역에서의 지진재해도 곡선 경사도와 유사한 결과를 보여주고 있다.
- 확률론적 지진재해도 결과로부터 작성한 UHS를 이용하여 URS를 작성한 결과 대체적으로 UHS에 비해 URS가 큰 값을 보여주고 있으며 특히 고진동수 구간 및 저진동수 구간에서 크게 증폭되는 것으로 나타났다.
- 추후 신규 원전 구조물 및 기기의 내진해석 및 설계를 위해서는 국내 원전부지에 대한 URS의 개발이 필요하며 이를 통하여 일관성 있는 안전성의 확보가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 등신뢰도 스펙트럼 작성에 필요한 일부 값들을 기존의 외국 연구에서 제시한 값들로 가정하여 수행한 것으로 추후 국내 실정에 적합한 등신뢰도 스펙트럼의 개발을 위해서는 이에 필요한 R_P, SF 등을 국내 실정에 따라 평가할 필요가 있으며 지진재해도 평가에서도 등신뢰도 스펙트럼 작성에 필요한 진동수에서의 감쇄식 개발 등이 필요하다.

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. 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-consistent Ground Motion Spectra Guidelines," NUREG/CR-6728, 2001.
4. US NRC Regulatory Guide 1.165, Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, 1997.
5. Robert P. Kennedy, "Risk Based Seismic Design Criteria," Nuclear Engineering and Design, 192, 1999.
6. Risk Engineering, Inc., "Technical Basis for Revision of Regulatory Guidance on Design Ground Motions: Development of Hazard- and Risk-consistent Seismic Spectra for Two Sites," NUREG/CR-6769, 2002.
7. US DOE, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-94, 1994.
8. **한국원자력연구소**, **지진재해도 평가의 불확실성 개선에 관한 연구**, KAERI/CR-65/99, 1999.