

# 확률론적 지진재해도를 이용한 시나리오 지진의 결정기법에 관한 연구

## Study on the Scenario Earthquake Determining Methods Based on the Probabilistic Seismic Hazard Analysis

최 인 길\* 中島正人\*\* 전 영 선\* 연 관 희\*\*\*  
Choi, In-Kil Masato Nakajima Choun, Young-Sun Yun, Kwan-Hee

### 국문요약

원전 구조물 및 기기의 내진설계를 위한 설계지진의 설정에는 결정론적 방법이나 확률론적 방법이 사용되어 왔다. 최근에는 확률론적 지진재해도 분석이 일반화되면서 확률론적으로 설계지진 및 평가용 지진의 설정 방법이 합리적인 방법으로서 인식되어 많이 사용되고 있다. 우리나라의 경우 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석이 확률론적 지진위험도 평가의 일환으로 대부분 완료되어 있다. 본 연구에서는 확률론적 지진재해도의 재분해를 통하여 확률론적 시나리오 지진을 산정할 수 있는 기법을 확립하고 국내 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석 결과를 이용하여 계산 예를 수행하였다. 이 기법을 사용하면 내진설계 및 내진안전성 평가에 활용할 수 있는 확률론적 시나리오 지진을 설정할 수 있어 매우 유용한 것으로 판단되며 합리적인 시나리오 지진의 산정을 위해서는 합리적인 지진구역도 및 감쇄식의 개발이 필요하다.

주요어 : 시나리오 지진, 지진재해도 분석, 지진재해도 재분해

### ABSTRACT

The design earthquake used for the seismic analysis and design of NPP (Nuclear Power Plant) is determined by the deterministic or probabilistic methods. The probabilistic seismic hazard analysis(PSHA) for the nuclear power plant sites was performed for the probabilistic seismic risk assessment. The probabilistic seismic hazard analysis for the nuclear power plant site had been completed as a part of the probabilistic seismic risk assessment. The probabilistic method become a reasonable method to determine the design earthquakes for NPPs. In this study, the defining method of the probability based scenario earthquake was established, and as a sample calculation, the probability based scenario earthquakes were estimated by the de-aggregation of the probabilistic seismic hazard. By using this method, it is possible to define the probability based scenario earthquakes for the seismic design and seismic safety evaluation of structures. It is necessary to develop the rational seismic source map and the attenuation equations for the development of reasonable scenario earthquakes.

Key words : scenario earthquake, seismic hazard analysis, de-aggregation

## 1. 서 론

우리나라 원전 구조물의 설계에는 US NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 제시한 Regulatory Guide 1.60<sup>(1)</sup>의 표준응답 스펙트럼을 사용하여 왔으나 이 표준응답 스펙트럼은 미국 서부 지역에서 발생한 강진자료를 이용하여 작성된 것으로 저진동수 영역에서는 매우 보수적인 값을 제시하고 있으나 반면에 고진동수 영역에서는 비보수적인 값을 보여주고 있다.<sup>(2)</sup> 최근 미국 서부 및 동부 지역에 대한 지진재해도 평가와 이에 근거한 스펙트럼의 개발을 통해 표준응답 스펙트럼의 사용에 문제가 있음이 드러났다.

구조물의 내진설계나 내진신뢰성 평가에 있어서는 지진 하중의 설정으로부터 구조물 응답의 불확실성 평가까지 각각의 단계에서 불확실성을 포함하고 있으며 특히 지진동 및 지진하중은 큰 불확실성을 내포하고 있다. 지진동을 평가하는 방법으로는 단층모델에 기초하여 그 단층이 파괴될 경우에 임의 부지에 예상되는 지진동을 예측하는 방법과

부지 주변의 단층이나 진원역을 확률모델로 평가하여 예상되는 평균적인 지진동을 예측하는 방법이 사용되고 있다. 후자의 방법을 확률론적 지진재해도 분석이라 부르며 지진의 발생으로부터 전파까지의 불확실성을 확률모델로 표현하는 것으로 이 발생확률을 나타내는 지표와 함께 정량적으로 평가하는 방법이다. 미국에서는 NRC가 1997년에 발표한 Regulatory Guide 1.165<sup>(3)</sup>에서 보는 바와 같이 지진재해도를 확률론적으로 평가하도록 기술하고 있으며 이에 따라 진원의 모델화, 지진동 거리 감쇄식, 지진발생시계열 등 요소기술에 대해서도 새로운 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 일본에서 개발된 확률론적 시나리오 지진의 작성방법을 기본으로 시나리오 지진 작성을 위한 프로그램을 개발하였으며, 과거에 수행된 국내 원전 부지의 확률론적 지진재해도 평가에 사용된 입력자료를 활용하여 지진재해도 평가를 수행하고 이를 재분해하여 확률론적 시나리오 지진을 산정하였다.

## 2. 확률론적 지진재해도 분석

확률론적 지진재해도 분석은 처음 Cornell<sup>(4)</sup>에 의해 이

\* 정회원 · 한국원자력연구소 책임연구원(대표저자 : cik@kaeri.re.kr)

\*\* 日本 電力中央研究所 研究員

\*\*\* 정회원 · 한전 전력연구원 선임연구원

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2004. 7. 14 / 심사종료일 : 2004. 12. 15)

본적인 기초가 개발 제안되었다. 그 후 Der Kiureghian and Ang<sup>(5)</sup> 등에 의해 분석방법이 개선되었으며 동시에 구조물의 내진설계나 지역의 지진방재에 있어서 입력지진동 평가에 이용되었다. 국내에서는 가동 중인 원전 및 신규 원전에 대한 확률론적 지진위험도 평가의 일환으로 대부분의 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석을 수행하여 왔다.

동일한 부지를 대상으로 하여도 전문가에 따라 진원의 모델화, 지진동 거리감쇄식의 선택은 다르기 때문에 재해도 분석의 결과가 다른 경우가 많다. 특히 진원의 모델화에 대해서는 현재까지도 전문가에 따라 의견이 다른 지진 발생원이 존재하고 있다. 이와 같은 지진발생원이 근처에 존재하는 부지에의 지진재해도를 평가하는 경우는 재해도 분석 결과 자체에 포함된 불확실성을 평가하여 명시하는 것이 특히 필요하다. 그리고 진원의 모델화에 관한 불확실성은 단층모델에 기초한 지진동 예측방법에서도 공통적인 문제를 내포하고 있다. 우리나라와 같이 강진기록이 거의 없고 매우 간략하게 기록된 역사지진 자료에 의해 지진원을 평가할 경우 전문가에 따른 편차 및 불확실성이 매우 크게 나타날 수 있다.

### 3. 지진재해도의 재분해

#### 3.1 지진재해도 재분해 개념

지진재해도 분석에서는 임의 부지에 대해 지진동강도(최대가속도, 최대속도 등의 최대지진동이나 응답스펙트럼)와 년초과확률과의 관계를 나타낸 재해도곡선을 얻는다. 이러한 재해도 곡선은 년초과확률에 대응하는 지진동강도를 주지만 구조물의 동적해석에서 필요한 지진동의 주기특성, 지속시간 등의 정보를 직접 주지는 못한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근 미국, 일본 등에서는 지진에 대한 확률론적 위험도평가 방법(Seismic Probabilistic Risk Assessment; SPRA)을 구성하는 평가항목의 하나인 확률론적 지진재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis; PSHA)을 확장하여 장래 부지에 영향을 미칠 가능성이 있는 지진의 제원(규모, 거리) 및 지진동을 평가하는 방법을 제안하였다.<sup>(3),(6)</sup> 이 방법에서는 확률론적 지진위험도 곡선 상에서의 년 초과확률에 대응하는 지진동 크기가 이상의 지진동을 발생시키는 지진의 집합으로부터 발생확률이 지배적인 지진의 제원(규모, 거리)을 설정한다. 여기서 설정된 지진을 시나리오 지진이라고 부른다.

#### 3.2 확률론적 시나리오 지진

시나리오 지진을 산정하기 위한 방법으로 일본에서는 龜田, 石川 등에 의해 “확률론적 시나리오 지진”<sup>(7),(8)</sup>의 개념이 개발되었으며 미국에서는 McGuire에 의해 “Beta Earth-

quake”<sup>(9)</sup>가 거의 동시에 개별적으로 제안되어, 그 후 U.S. NRC에 의해 “Controlling Earthquake”<sup>(3)</sup>가 제안되었다. 이들 방법은 모두 확률론적 지진재해도의 재분해(De-aggregation or Dis-aggregation)를 통하여 확률론적 시나리오 지진을 산정하는 것이다.

시나리오 지진 제원의 전반적인 산정 절차는 두 방법이 동일하다. 구체적으로 두 방법에서 지진재해도 분석을 수행하여 지진재해도 곡선을 산정한다. 그리고 부여된 참조확률에 대응하는 곡선으로부터 구한 지진동 강도를 규모와 거리에 관해 재분해 한다. 그러나 재분해 및 지진제원(규모  $M$ 과 거리  $D$ )의 설정방법이 각각의 방법에서 차이가 있다. US NRC의 방법<sup>(3)</sup>에서는  $M$ 과  $D$ 에 대해 조합한 Bin(구간)을 채용하고 지진동 강도의 재분해를 수행한다. 또 시나리오 지진의 제원으로 선정된 규모와 거리에 대해서 미국 NRC의 방법에서는 단주기 영역(경우에 따라서는 장주기영역도)에 대한  $M$ 과  $D$  각각의 대표값을 하나로 산출한다.

龜田, 石川은 확률론적 지진재해도 분석과 시나리오지진이라고 하는 종래 별개의 지진하중 평가방법을 통합하여 확률론적 시나리오지진을 설정할 수 있는 방법론을 제안하였다.<sup>(7),(8)</sup> 이 방법은 부지 주변의 지진발생 모델을 설정하면 재현기간에 대응하는 지진의 제원(규모 기대치  $\bar{M}$ , 진앙거리 기대치  $\bar{\Delta}$ )이 산출되며 나아가 각 지진발생원의 공현도라고 하는 새로운 개념을 도입한 것으로 공현도에 대응하는 복수의 시나리오지진을 설정할 수 있는 특징이 있다. 확률론적 시나리오지진의 제원(규모, 진앙거리의 조건부 기대치)은 부지에서 임의 강도 이상의 지진동이 발생하는 조건하에서 설정한 지진재해도 모델로부터 다음 식에 의해 구할 수 있다.<sup>(6)-(8),(10)</sup>

$$\bar{M}(P_0) = \frac{\sum_{k=1}^n E_k(M|Y \geq y(p_0)) \cdot w_k(p_0)}{\sum_{k=1}^n w_k(p_0)} \quad (1)$$

$$\bar{\Delta}(P_0) = \frac{\sum_{k=1}^n E_k(\Delta|Y \geq y(p_0)) \cdot w_k(p_0)}{\sum_{k=1}^n w_k(p_0)} \quad (2)$$

여기서  $w_k(p_0)$ 는 지진발생원  $k$ 에서 발생하는 지진 중에서 부지에  $y(p_0)$  이상의 지진동을 발생시키는 지진의 년 발생빈도를 나타낸다. 또한  $n$ 은 지진발생원의 수를 나타낸다.

### 4. 참조확률의 설정

#### 4.1 미국 NRC의 참조확률 설정법

미국 NRC의 R.G. 1.165<sup>(3)</sup>에서는 참조확률을  $10^{-5}$ 으로 설정하고 있다. 이는 안전정지지진(Safe Shutdown Earth-

quake; SSE)을 초과하는 년초확률로 구체적으로는 현재 미국에서 운전중인 플랜트에 대하여 SSE를 초과하는 확률을 평가한 것의 중앙값으로 정하고 있다. 즉, 참조확률은 독자적으로 결정된 절대값이 아니며 새로운 플랜트에 대하여 운전중인 플랜트의 SSE의 초과확률의 중앙값을 확보하도록 결정된 상대적인 값이다.

## 4.2 일본의 참조확률 설정법

### 4.2.1 설계용 최강지진

일본 원전 설계에 대한 심사지침에는 “역사적 자료로부터 과거에 부지 또는 그 근방에 영향을 미친 것으로 판단되는 지진이 재발하여 부지 및 그 주변에 동일한 영향을 미칠 수 있는 지진 및 가까운 장래에 부지에 영향을 미칠 것으로 예상되는 활동도가 높은 활성단층에 의한 지진 등으로부터 가장 영향이 큰 것을 선정한다.”라고 기술되어 있다. 먼저 “역사적자료에 기초한 가장 큰 영향을 미친 지진을 고려한다”는 점에서 볼 때, 그 예로 “新編日本被害地震總覽”에는 과거 1,000년 이상의 피해지진이 기록되어 있지만 연대나 지역에 따른 정도의 차이가 매우 크다. 지방도 포함된 전국의 현저한 피해지진으로는 에도시대(江戸時代) 이후의 약 400년 정도가 기록되어 있다. 그러므로 역사자료에 기초한 설계용 강지진에 대응하는 참조확률은  $2.5 \times 10^{-3}$  정도가 된다. 활성단층에 관해 보면 “10,000년 이전 이후 활동한 것 또는 지진의 재래주기가 10,000년 미만의 것”을 고려하면 대응하는 참조확률의 최소치는  $10^{-4}$ 이 된다.

### 4.2.2 JEAG의 기준

일본 JEAG(Japan Electric Association Group)에서 제시한 원자력발전소 내진설계 기술지침<sup>(11)</sup>에서는 운전상태와 지진동과의 조합의 확률적평가 항에서 기준지진동  $S_1$ ,  $S_2$ 의 발생확률을 나타내고 있으며, 이에 따르면  $S_1$ 의 발생확률은  $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-4}$ ,  $S_2$ 의 발생확률은  $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ 로 되어 있다.

## 4.3 IAEA Safety Standard의 기준

IAEA Safety Standard Series No. 50-SG-S1<sup>(12)</sup>에는 설계용 지진동으로 2개의 서로 다른 레벨 (SL-1 과 SL-2)을 고려하는 것이 일반적이라고 기술되어 있다. SL-2는 최종적인 안전성 확보(Ultimate Safety Requirements)에 대응하는 것으로서 시설의 사용기간 내에 초과하는 확률이 매우 작은 설계에 사용하는 지진동으로서는 최대의 수준의 지진동이며, SL-1은 SL-2 보다도 발생가능성이 높지만 지진동의 크기는 작은 요구성능(SL-2에서는 안전성 확보관점에서)에 대응하여 결정하는 지진동의 크기이다. 이에 따른 각각의 수준과 확률의 대응 예로 SL-1으로는 년초과확률  $10^{-2}$ , SL-2로는 년초과확률  $10^{-4}$ 에 대응하는 값을 사용한 사례가 있다.

## 5. 국내 원전부지에 대한 평가 예

본 연구에서는 최근 수행된 국내 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석 결과를 이용하여 원전 부지에 대한 시나리오 지진을 작성하였다. 시나리오 지진 작성에 사용된 방법은 龜田과 石川이 제시한 방법 및 절차<sup>(7),(8)</sup>에 따라 수행하였다. 평가에 사용한 프로그램은 원자력연구소와 일본 전력중앙연구소에서 공동 개발한 것이다.<sup>(13)</sup>

지진재해도 분석에서는 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.<sup>(14)</sup> 그림 1~4에 각각의 전문가 팀에서 제시한 지진구역도를 보여주고 있다. 실제 지진재해도 분석에서는 이외에 여러 가지 구역도가 제시되었으나 본 연구에서는 각 팀에서 제시한 대표적인 지진구역도만을 사용하였다. 또한 표 1~4에서는 각각의 지진구역도 모델에 대한 지진 파라메타를 보여주고 있다. 표에서  $a_0$  및  $b_0$ 는 Gutenberg-Richter 관계식에서의 상수값으로 임의의 지진원에서 지진강도 별 발생빈도를 나타낸다.<sup>(14)</sup>

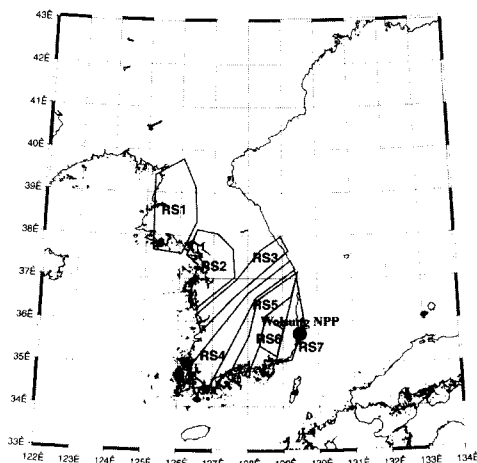


그림 1 지진구역도모델 A

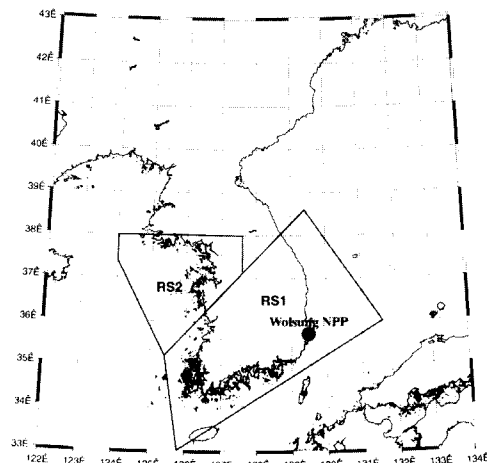


그림 2 지진구역도모델 B

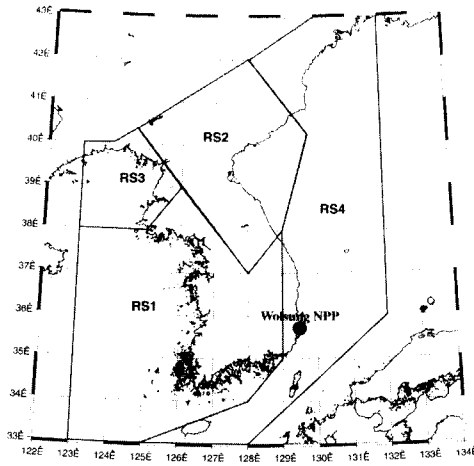


그림 3 지진구역도모델 C

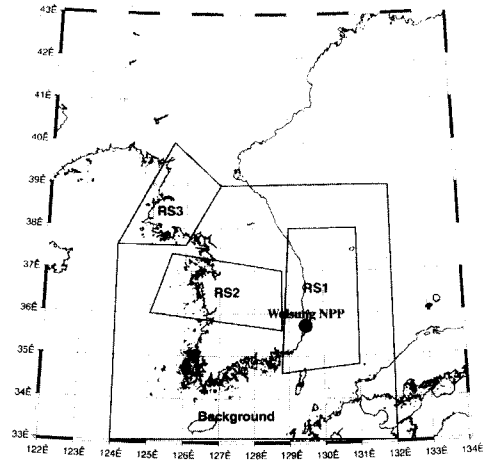


그림 4 지진구역도모델 D

표 1 지진구역도 모델 A에 대한 지진 파라메타

Source ID	Seismicity Parameters		Maximum Magnitude
	$a_0$	$b_0$	
Source 1	4.28	1.12	7.1
Source 2	3.53	0.92	7.4
Source 3	2.59	0.69	7.6
Source 4	2.34	0.66	7.2
Source 5	3.10	0.87	7.6
Source 6	2.12	0.66	7.2
Source 7	1.70	0.59	7.7

표 2 지진구역도 모델 B에 대한 지진 파라메타

Source ID	Seismicity Parameters		Maximum Magnitude
	$a_0$	$b_0$	
Source 1	2.9282	0.7614	7.0
Source 2	2.5331	0.75	6.5

표 3 지진구역도 모델 C에 대한 지진 파라메타

Source ID	Seismicity Parameters		Maximum Magnitude
	$a_0$	$b_0$	
Source 1	3.092	0.8	6.3
Source 2	2.981	0.8	6.3
Source 3	2.506	0.7	7.0
Source 4	1.547	0.6	6.5

표 4 지진구역도 모델 D에 대한 지진 파라메타

Source ID	Seismicity Parameters		Maximum Magnitude
	$a_0$	$b_0$	
Source 1	1.0926	0.58	7.0
Source 2	1.9728	0.58	6.8
Source 3	2.5787	0.58	6.8
Background Source Zone	2.2868	0.58	6.5

지진재해도 분석에 사용된 지반운동 감쇄식 역시 과거의 연구<sup>(14),(15)</sup>에서 지진 전문가에 의해 제시된 것으로 3개의 식에 대해 가중치를 부여하여 제시하였으나 본 연구에서는 가중치를 무시하고 각각의 감쇄식을 개별적으로 적용하였다. PGA(Peak Ground Acceleration)에 대해 제시된 지반운동 감쇄식들은 다음과 같다.

$$\ln PGA \text{ (cm/sec}^2\text{)} = 0.4 + 1.2M - 0.76 \ln R - 0.0094 R$$

$$R = \sqrt{R_{epi}^2 + 10^2} \quad (3)$$

$$\ln PGA \text{ (cm/sec}^2\text{)} = 1.76 + 1.2M - 1.28 \ln R - 0.0018 R$$

$$+ 0.05 \max\left(\ln \frac{R}{100}, 0\right) \quad R = \sqrt{R_{epi}^2 + 9.3^2} \quad (4)$$

$$\ln PGA \text{ (cm/sec}^2\text{)} = 5.0244 + 0.5442M - 1.002 \ln(R_{epi} + 8) \quad (5)$$

여기서,  $PGA$  : 최대지반가속도

$M$  : 지진의 규모

$R$  : 진원거리 (km)

$R_{epi}$  : 진앙거리 (km)

위의 식 (3)의 감쇄식은 국내 지진자료를 이용하여 국내 지반특성을 고려하여 제시된 감쇄식<sup>(16)</sup>이며(감쇄식 ①) 식 (4)와 (5)의 감쇄식(감쇄식 ②, ③)은 각각 미국 동부지역과 중국의 지진 및 지반특성을 고려하여 산정된 감쇄식<sup>(15),(17)</sup>이다.

전문가 팀에 의해 제시된 지진재해도 입력자료를 이용하여 부지에 대한 지진재해도를 산정하였다. 그림 5~8은 각각의 지진구역도 모델에 3가지 감쇄식을 적용하였을 경우의 지진재해도 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 지진구역도 모델에 관계없이 ②번 지반운동 감쇄식을 적용하였을 경우의 재해도가 가장 큰 것으로 나타났다. 나머지 두개의 감쇄식에서는 비교적 유사한 경향을 보

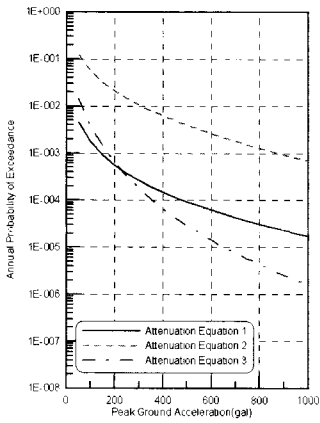


그림 5 지진구역도 모델 A에 대한 재해도곡선

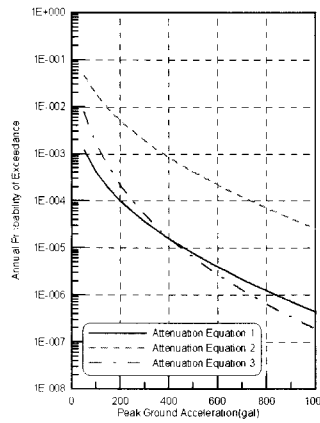


그림 6 지진구역도 모델 B에 대한 재해도곡선

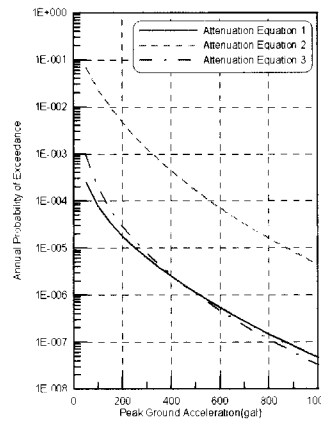


그림 7 지진구역도 모델 C에 대한 재해도곡선

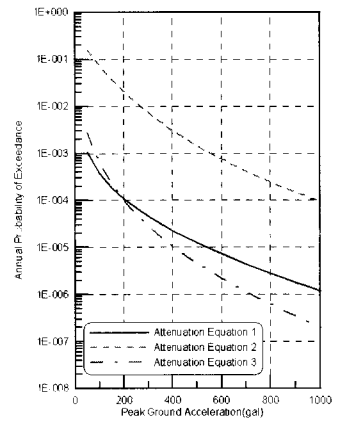
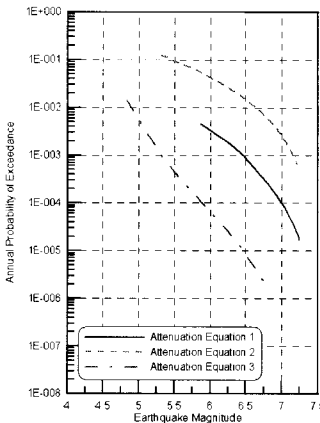
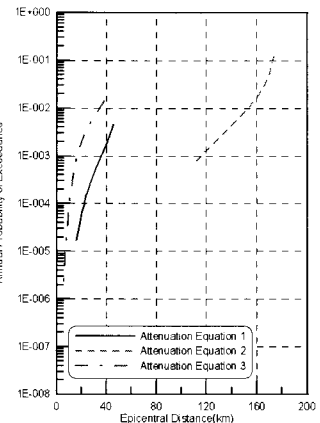


그림 8 지진구역도 모델 D에 대한 재해도곡선

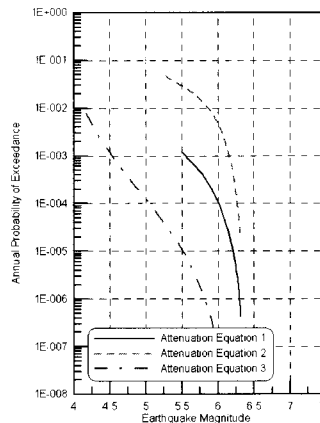


(a) 재해도적합 규모

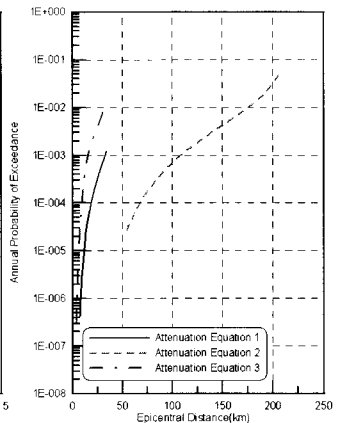


(b) 재해도적합 거리

그림 9 지진구역도 모델 A에 의한 재해도적합 규모 및 거리

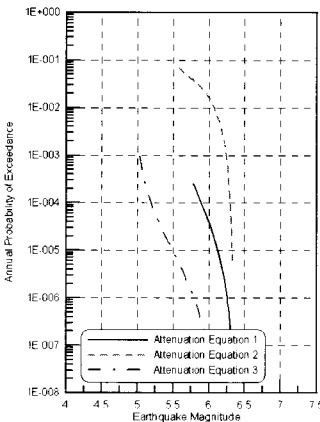


(a) 재해도적합 규모

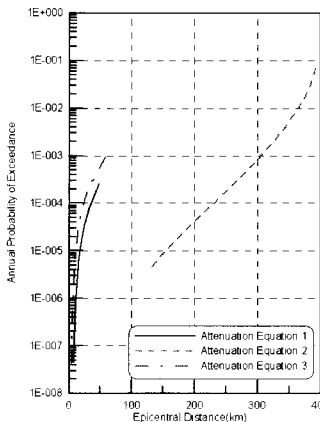


(b) 재해도적합 거리

그림 10 지진구역도 모델 B에 의한 재해도적합 규모 및 거리

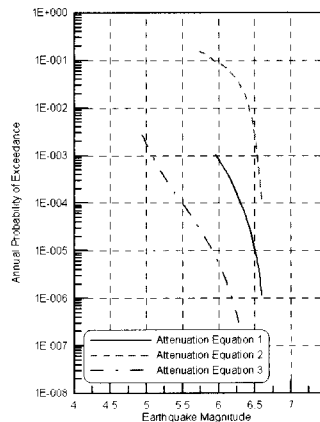


(a) 재해도적합 규모

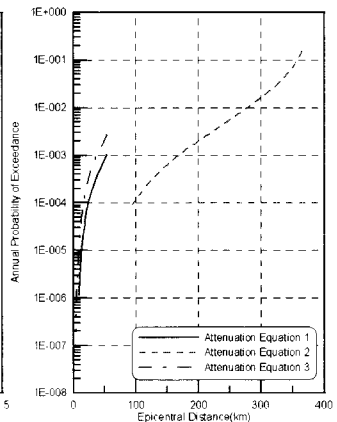


(b) 재해도적합 거리

그림 11 지진구역도 모델 C에 의한 재해도적합 규모 및 거리



(a) 재해도적합 규모



(b) 재해도적합 거리

그림 12 지진구역도 모델 D에 의한 재해도적합 규모 및 거리

여주고 있으나 우리나라에 대해 제시된 지반운동 감쇄식을 사용할 경우 년초과확률이 감소함에 따라 PGA 증가가 뚜렷하게 나타났으며 그 기울기는 미국 동부 지역에 대해 제시된 감쇄식과 유사한 경향을 보여주고 있다.

국내 원전의 설계에 적용하고 있는 SSE를 기준으로 년초과확률을 산정해 보면 감쇄식 ① 과 ③에 의한 값은  $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-5}$ 로 나타났으며 감쇄식 ②에 의한 값은

$2 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-3}$ 로 매우 크게 나타났다.

그림 9~12에서는 각각의 지진재해도 결과를 재분해하여 산정한 재해도적합 규모 및 재해도적합 거리를 년초과확률에 따라 보여주고 있다. 시나리오 지진의 제원을 설정할 경우에는 먼저 앞서 기술한 참조확률을 설정하고 그에 따른 지진의 규모 및 거리를 도표로부터 얻을 수 있다.

그림에서 보는 바와 같이 감쇄식 ②를 사용할 경우 지

진구역도 모델에 관계없이 지진의 규모가 매우 크게 나타났으며 진앙거리 또한 매우 먼 것으로 나타나고 있다. 그러나 감쇄식 ③을 사용할 경우 지진의 규모는 작으나 진앙거리가 매우 가까운 것으로 나타나고 있다. 감쇄식 ①을 사용할 경우 지진의 규모는 대체적으로 중간값을 보여주고 있으나 진앙거리는 감쇄식 ③과 유사한 근거리에서의 지진으로 나타나고 있다.

시나리오 지진을 설정하기 위해서는 앞서 기술한 바와 같이 먼저 참조확률을 설정하여야 한다. 우리나라의 경우에 대한 규정이 없어 본 연구에서는 임의로 참조확률을  $10^{-3}$ 으로 설정하였다. 부지에서의 확률론적 시나리오 지진의 계원을 참조확률  $10^{-3}$ 으로 규정하였을 경우의 값을 표 5~7에서 사용된 감쇄식 및 각각의 지진원구역 모델에 따라 보여주고 있다. 표 5에서 보는 바와 같이 감쇄식 ①을 사용하였을 경우 PGA는 50~140 gal로 나타났으며 시나리오 지진의 규모는 5.6~6.5, 진앙거리는 33~52 km로 나타났다. 또한 동일한 참조확률에서는 지진원구역 모델 A에 의한 시나리오 지진이 가장 크게 나타났다.

감쇄식 ②를 사용하였을 경우에는 PGA가 330~860 gal로 매우 크게 나타났으며 시나리오 지진의 규모는 6.2~7.2, 진앙거리는 110~305 km로 지진의 규모는 매우 크나 진앙거리가 매우 먼 것으로 나타났다. 또한 동일한 참조확률에서는 감쇄식 ①을 사용하였을 경우와 마찬가지로 지진원구역 모델 A에 의한 시나리오 지진이 규모 7.2, 거리 116km로 가장 크게 나타났다.

감쇄식 ③을 사용하였을 경우에는 PGA가 80~170 gal로 매우 크게 나타났으며 시나리오 지진의 규모는 4.5~5.3, 진앙거리는 15~37 km로 지진의 규모는 매우 작으나 진앙거리가 아주 가까운 것으로 나타났다. 특히 진앙거리는 최근 발생한 대만 Chi-Chi 지진 등으로 인해 관심의 대상이 되고 있는 근거리 지진으로 분류할 수 있을 정도로 가까운 거리에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한 동일한 참조확률에서는 앞에서의 두 경우와 마찬가지로 지진원구역 모델 A에 의한 시나리오 지진이 규모 5.3, 거리 16km로 가장 크게 나타났다. 이와 같이 비록 지진의 규모는 작으나 진앙거리가 가까운 시나리오 지진에 대해서는 설계지진을 설정할 때 근거리지진이 가지는 NFRD(Near Fault Rupture Directivity) 영향<sup>(18)</sup> 등을 고려하여 설정하는 것이 바람직하다.

표 5 감쇄식 ①에 의한 지진구역도별 시나리오지진(년초과 확률 :  $10^{-3}$ )

	$y(p_0)$ (gal)	$M(p_0)$	$\Delta(p_0)$ (km)
Model A	140	6.5	35
Model B	60	5.6	33
Model C*	-	-	-
Model D	50	5.9	52

\* : 모델 C에서는 년초과확률  $10^{-3}$ 에서의 값이 존재하지 않음

표 6 감쇄식 ②에 의한 지진구역도별 시나리오지진(년초과 확률 :  $10^{-3}$ )

	$y(p_0)$ (gal)	$M(p_0)$	$\Delta(p_0)$ (km)
Model A	860	7.2	116
Model B	380	6.2	110
Model C	330	6.3	305
Model D	560	6.6	170

표 7 감쇄식 ③에 의한 지진구역도별 시나리오지진(년초과 확률 :  $10^{-3}$ )

	$y(p_0)$ (gal)	$M(p_0)$	$\Delta(p_0)$ (km)
Model A	170	5.3	16
Model B	120	4.5	15
Model C*	-	-	-
Model D	80	5.2	37

\* : 모델 C에서는 년초과확률  $10^{-3}$ 에서의 값이 존재하지 않음

이상에서 보는 바와 같이 전문가 그룹이 제시한 지진구역도 및 지반운동 감쇄식에 따라 확률론적 시나리오 지진의 지진 규모 및 진앙거리는 큰 차이를 보여주고 있다. 따라서 구조물의 설계에 필요한 합리적인 하나의 설계지진을 선정하기 위해서는 전문가들의 의견이 결집된 지진구역도 및 지반운동 감쇄식의 개발이 필요하다. 일본의 경우 설계지진 설정 시 하나의 부지에 대해 하나의 지진구역도 및 감쇄식의 사용이 일반적이다.

그러나 이와 같이 다양한 지진구역도 및 지반운동 감쇄식을 사용할 경우 구조물의 내진 안전성 평가나 지진취약도 평가 등을 위한 다양한 시나리오 지진을 산출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 근거리 지진 및 원거리 지진의 특성을 나타내는 다양한 지진의 규모 및 거리를 산출할 수 있어 구조물 및 기기의 내진안전성 평가 시 하나의 입력지진 만을 사용하는 것에 비해 객관적이고 합리적인 결과를 도출해 낼 수 있다. 즉 하나의 지진기록만으로는 평가용 지진의 지속시간, 진동수 특성 등을 대변하기에는 부족하므로 다양한 시나리오 지진을 사용함으로써 이 문제를 해결할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 확률론적 시나리오 지진을 산정하는 기법을 확립하고 국내 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석 결과를 이용하여 시나리오 지진 작성 예를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

확률론적 지진재해도의 재분해를 통해 시나리오 지진을 설정하면 설계 및 평가용 지진의 설정 시 지진동 크기 이외에 취급하는 것이 불가능하였던 주파수특성 등의 복수의 지진동 파라메타를 동시에 평가하는 것이 가능하여 보다 합리적으로 설정할 수 있을 것으로 판단되나 이를 위해서는 개별적인 지진원이나 지반운동 감쇄식 등에 대한 정확

한 평가가 요구된다. 또한 본 연구에서 사용한 지진재해도 및 재분해 방법에 의해 시나리오 지진의 제원을 산정할 경우 다양한 시나리오 지진의 작성이 가능하다.

본 연구에서 제시한 방법을 사용하여 국내 원전 부지에 대한 확률론적 시나리오 지진을 합리적으로 산정하기 위해서는 지진구역도 및 개별 지진원에 대한 객관적이고 합리적인 평가가 이루어져야 하며 국내 지질·지진 특성에 맞는 지반운동 감쇄식의 개발이 지속적으로 수행되어야 한다. 또한 추후 국내 지질 및 지진 특성을 고려하여 설계지진의 스펙트럼 형상을 결정하기 위한 연구뿐 아니라 이들 스펙트럼 형상에 부합된 시간이력의 산정을 위한 지진의 규모 및 진앙거리에 따른 강진지속시간, 포락함수 등의 설정을 위한 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

### 참고 문헌

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. US NRC Regulatory Guide 1.165, *Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion*, 1997.
4. C. A. Cornell, "Engineering Seismic Risk Analysis," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.58, No. 5, pp. 1583-1606, 1968.
5. A. Der-Kiureghian, and A. H-S. Ang, "A Fault Rupture Model for Seismic Risk Analysis," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.67, No.4, 1997, pp. 1173-1194.
6. J. Hirose, K. Muramatsu, T. Okumura, and S. Taki, "A Procedure for the Determination of Scenario Earthquakes for Seismic Design Based on Probabilistic Seismic Hazard Analysis," JAERI-Research 2002-009, 2002.
7. 龜田弘行, 石川 裕, "ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析の擴張," 土木學會論文集, No. 392/I-9, 1984.
8. 龜田弘行, 石川 裕, 中島正人, "確率論的想定地震の概念と應用," 土木學會論文集, No.577/I-41, 1997.
9. R.K. McGuire, "Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes : Closing the Loop," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.85, No.5, 1995, pp. 1275-1284.
10. K. Muramatsu and J. Hirose, "The Use of Seismic Hazard Analysis for Determining Scenario Design Earthquakes - An Overview of a Recently Completed Work at JAERI -," *Proceedings of the Seventh Korea-Japan Joint Workshop on Probabilistic Safety Assessment*, 2002.
11. 社團法人 日本電氣協會, 原子力發電所耐震設計技術指針 (重要度分類・許容應力編 : JEAG 4601・補-1984), 1984.
12. IAEA, *Earthquakes and Associated Topics in Relation to NPP Siting*, IAEA Safety Standard Series No. 50-SG-S1 (Rev. 1), 1991.
13. Central Research Institute of Electric Power Industry, "Korea-Japan Joint Research on Development of Seismic Capacity Evaluation and Enhancement Technology Considering Near-Fault Effect (Annual Report 2003)," KAERI/RR-2392/2003, 2003.
14. 서정문, 민경식, 전영선, 최인길, "지진재해도 평가의 불확실성 개선에 관한 연구," KAERI/CR-65/99, 1999.
15. Korea Electric Power Research Institute, "An Evaluation of Inputs to the Probabilistic Seismic Hazard Analysis," Technical Report TR.96NJ21.J1999.72, 1999.
16. Baag, Chang-Eob, Chang, Sung-Joon, Jo, Nam-Dae and Shin, Jin-Soo, "Evaluation of Seismic Hazard in the Southern Part of Korea," *Proceeding of the 2nd International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Region of Moderate Seismicity*, 1998.
17. G. R. Toro, N. A. Abrahamson, and J. F. Schneider, "Model of Strong Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties," *Seismological Research Letters*, Vol.68, No.1, 1997.
18. Paul Somerville, "Characterization of Near-Fault Ground Motions," *U.S.-Japan Workshop on the Effects of Near-Field Earthquake Shaking*, San Francisco, California, 2000, pp. 21-29.