

근거리지진 영향을 고려한 시나리오지진의 스펙트럼형상 결정

Determination of Response Spectrum Shape for Scenario Earthquakes Considering Near-Fault Ground Motion Effects

최인길, 전영선, 서정문, 김형규

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

요 약

본 연구에서는 확률론적 지진재해도 결과를 이용한 확률론적 시나리오지진 및 단층 변위에 대한 시나리오 지진에 대해 지진재해도 해석 시의 지반운동 감쇄식을 이용하여 스펙트럼 형상을 작성하고 이를 미국 서부 및 중동부 지역에 제시된 경험식에 의한 형상과 비교하였다. 또한 근거리지진의 영향을 고려하여 스펙트럼 형상을 수정하였다. 설정된 시나리오 지진에 대해 지반운동 감쇄식 및 미국 NRC의 스펙트럼 형상식을 적용하여 스펙트럼을 작성한 결과 감쇄식에 의한 형상이 미국 동부지역에 대한 스펙트럼 형상과 매우 유사하게 나타났다. 근거리 지진의 영향을 고려하기 위해 NFRD(Near Fault Directivity Effect) 영향을 스펙트럼 형상에 수정계수로 고려하여 시나리오 지진에 대한 스펙트럼을 수정한 방법은 근거리지진의 특성을 설계지진 등의 결정에 효과적으로 고려할 수 있는 방법으로 판단된다.

ABSTRACT

In this study, the response spectrum shapes for the probability based scenario earthquakes and the scenario earthquake caused by the fault slip were developed using the ground motion attenuation equations proposed by the ground motion experts in PSHA study. These spectrum shapes were compared with the response spectra by the empirical equations proposed for the WUS and CEUS sites. The response spectra from the attenuation equations are very similar to the spectra from the CEUS 1-corner frequency model. The spectra for the scenario earthquakes were modified to incorporate the near-fault ground motion effects by using the correction factor. This modifying method can be used for the determination of design ground motion considering the near-fault ground motion effects.

1. 서론

최근 미국에서는 지진에 대한 확률론적 안전성평가 방법을 구성하는 평가항목의 하나인 확률론적 지진재해도 해석을 확장하여 장래 부지에 영향을 미칠 가능성이 있는 지진의 제원(규모, 거리) 및 지진동을 평가하는 방법을 제안하였다[1]. 이 방법에서는 확률론적 지진재해도 곡선 상에서의 년 초과확률에 대응하는 지진동 크기 이상의 지진동을 발생시키는 지진의 집합으로부터 발생확률이 지배적인 지진의 제원(규모, 거리)을 설정한다. 여기서 설정된 지진을 확률론적 시나리오지진(Probability Based Scenario Earthquakes)라고 부른다.

일본에서는 과거의 지진재해도해석에서의 지진강도와 그 년 초과확률과의 관계 이외에 주파수특성 등의 복수의 지진동 파라메타를 동시에 평가할 수 있는 개념이 龜田 및 石川 등의 연구[2]에 의해 개발되었다. 또한 내진설계에 이용하는 기준지진동은 결정론적인 방법에 기초하여 책정하고 있으며, 확률론적인 개념에 기초한 평가방법을 설계에 적용하는 것은 아직 검토단계에 있다.

지진재해도의 재분해를 통하여 원전 부지에 대한 확률론적 시나리오 지진을 설정하였다 하더라도 실제 원전 구조물의 설계 및 내진해석을 위해서는 입력지진동의 정의가 필요하다. US NRC Regulatory Guide 1.165 [1] 에서도 통제지진의 설정방법 및 SSE (Safe Shutdown Earthquake) 스펙트럼의 결정방법을 제시하고 있으나 시나리오 지진에 대한 스펙트럼 형상의 결정방법을 제시하지 않고 있다. 일본의 경우에는 일반적으로 스펙트럼 형상을 지진재해도 해석에 사용된 지반운동 감쇄식을 이용하여 설정하고 있다.

PSHA(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)에서는 지반운동세기의 확률분포로 나타나는 재해도곡선으로 모든 지진의 발생가능성, 서로 다른 크기의 지진의 상대빈도 및 지반운동 특성의 반영 및 다양한 가정사항에 대한 불확실성의 모델링 등의 특성을 통합할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 설계지진이라는 개념을 가지고 있지 않다는 단점이 있다. 스펙트럼 형상이나 특성이 필요한 구조물이나 기기의 설계에서는 이러한 단점은 치명적이 될 수 있다.

이러한 필요성에 따라 미국 NRC에서는 지진자료가 풍부한 미국 서부지역(WUS)에 대해서는 과거의 지진관측 자료들을 이용하여 스펙트럼 형상을 결정할 수 있는 방법을 제시하였으며 지진자료가 빈약한 미국 동부 지역(EUS)에 대해서는 반 경험적인 식을 제시하였다[3].

본 연구에서는 국내 원전부지에 대해 설정된 시나리오 지진에 대한 스펙트럼 형상을 결정하기 위해 지진재해도 해석에 사용된 감쇄식들을 이용하여 스펙트럼을 작성하고 미국 서부 및 동부지역에 대해 제시된 식들에 의해 작성된 스펙트럼 형상과 비교하였다. 또한 근거리 지진의 영향을 고려하여 시나리오 지진에 대해 작성된 스펙트럼 형상을 수정하였다.

2. 시나리오 지진

본 연구에서는 시나리오 지진 작성 절차에 따라 국내 원전 부지에 대한 시나리오 지진을 작성하기 위하여 지진재해도 재분해를 수행하였다. 본 연구에서 채택한 방법은 US

NRC Regulatory Guide 1.165[1]에서 제시한 방법 및 절차에 따라 수행하였다. 확률론적 시나리오 지진의 설정을 위해 기존 국내 원전부지에 대한 확률론적 지진재해도 해석 결과[4]를 이용하여 시나리오 지진을 작성하였다. 이러한 절차 및 자료를 이용하여 산정한 국내 원전부지의 확률론적 시나리오 지진을 표 1에 나타내었다.

일본에서는 고베 지진 이후 지진발생원으로서의 활성단층의 중요성이 지적되어 왔으며 지진재해도 평가에 있어서도 활성단층 모델을 고려한 예가 증가하고 있다. 우리나라의 경우에도 최근 월성 원전 주변에서 단층이 발견되어 이들 단층의 활성여부에 많은 관심이 고조되고 있으며, 이들 단층에 대한 규명을 위해 연구가 진행되고 있다.

단층의 길이에 따른 발생 가능한 지진의 규모에 대한 경험식들이 과거에 발생한 지진 자료를 참고로 하여 많이 제안되어 있다. 이들 식들의 단층길이와 지진규모의 관계를 그림 1에 나타내었다[5]. 그림에서 보는 바와 같이 이들 경험식으로 단층 길이에 따른 발생 가능한 지진을 산정할 경우 많은 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 확률론적 시나리오지진 및 단층 변위에 의한 시나리오 지진

시나리오지진 1	시나리오지진 2	시나리오지진 3
확률론적 시나리오 지진		단층 변위에 의한 시나리오 지진
1Hz	5-10Hz	
M6.4, 9.0km	M6.2, 13.0km	M6.8, 5.0km

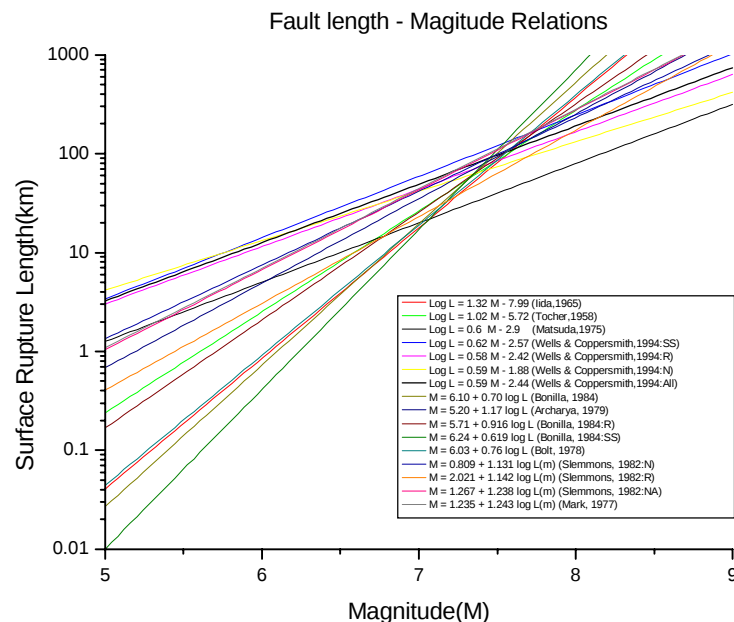


그림 1. 경험식에 의한 단층길이와 지진 규모의 관계

일본의 내륙 및 주변해역의 단층명, 길이, 주향, 경사방향, 단층형태 등에 대해서는 활 단층연구회의 자료[6]로부터 얻을 수 있다. 활성단층의 길이 $L(\text{km})$ 이 주어진 경우 이 활성단층으로부터 발생하는 규모는 식 (1)로 松田에 의해 제시된 경험식[7]에 의해 구하는 경우가 많다.

$$\log_{10}L=0.6M-2.9 \quad (1)$$

한번의 활동으로 인한 단층변위 D 와 지진의 규모와의 관계는 일반적으로 다음의 松田 [7]이 제시한 방법에 따라 산정한다.

$$\log_{10}D=0.6M-4.0 \quad (2)$$

고베지진에서도 밝혀진 바와 같이 1회의 지진에서 활동한 단층은 1개로 한정하지 않는다. 1회의 지진(사상)에서 동시에 활동하였다고 가정할 수 있는 단층군을 그룹화 하는 것은 중요하고 어려운 일이다.

본 연구에서는 우리나라 원전 부지 주변에서 발생할 수 있는 단층에 의한 지진의 규모를 추정하고자 관련 자료를 검토하였으나 현재 이들 단층에 대한 조사 및 연구가 진행 중에 있어 국내 원전 부근의 단층변위가 1.2m라는 가정 하에 시나리오 지진을 설정하였다. 이 변위가 한번의 활동에 의해 발생되었다는 가정 하에 위의 Matsuda에 의해 제시된 식 (2)를 적용하여 시나리오 지진을 설정한 결과로 규모 6.8, 거리 5km의 시나리오 지진을 설정하였다.

3. 스펙트럼 형상 결정

앞에서 지진재해도의 재분해를 통하여 국내 원전부지의 시나리오 지진을 설정하였다. 그러나 실제 원전 구조물의 설계 및 내진해석을 위해서는 입력지진동의 정의가 필요하다. US NRC Regulatory Guide 1.165 [1] 에서도 통제지진의 설정방법 및 SSE 스펙트럼의 결정방법을 제시하고 있으나 시나리오 지진에 대한 스펙트럼 형상의 결정방법을 제시하지 않고 있다. 일본의 경우에는 일반적으로 스펙트럼 형상을 지진재해도 해석에 사용된 지반운동 감쇄식을 이용하여 설정하고 있다.

앞서 기술한 바와 같이 PSHA에서는 이상의 모든 사항을 지반운동세기의 확률분포로 나타나는 재해도곡선으로 통합할 수 있는 장점을 가지고 있으나 설계지진이라는 개념을 가지고 있지 않다는 단점이 있다. Ishikawa and Kameda 역시 공간적으로 넓은 지역에 대한 지진의 발생은 단일 지역이 아닌 넓은 지역에 대한 정보를 필요로 한다는 사실을 지적하였다[8]. 이는 모든 파라메타가 재해도곡선이라는 하나의 결과에 종합된다는 방법론적 특성에 기인한다.

이러한 필요성에 따라 미국 NRC에서는 강진 자료가 비교적 풍부한 미국 서부지역(WUS)에 대해서는 과거에 발생한 지진관측 자료들을 이용하여 스펙트럼 형상을 결정할 수 있는 경험식을 제시하였으며 지진자료가 빈약한 미국 동부 지역(EUS)에 대해서는 서

부지역에 대한 식을 기반으로 하여 반 경험적인 식을 제시하였다[3].

본 연구에서는 국내 원전부지에 대해 설정된 시나리오 지진에 대한 스펙트럼 형상은 기존의 지진재해도 해석에 사용된 전문가에 의해 제시되었던 지반운동 감쇄식에 근거하여 스펙트럼을 작성하였다. 이 때 PGA(Peak Ground Acceleration) 및 스펙트럴 가속도에 대해 각각 3개의 감쇄식[4]이 사용되었으며 각각의 감쇄식에 대해 가중치를 두어 최종적인 스펙트럼 형상을 결정하였다. 감쇄식에 의해 작성된 스펙트럼 형상을 미국 서부 및 동부지역에 대해 제시된 식들에 의해 작성된 스펙트럼 형상과 비교하였다.

앞서 기술한 바와 같이 미국 서부지역에 대한 스펙트럼 형상 결정 식은 많은 계측 자료를 통계 처리하여 얻은 식이며, 중동부 지역의 경우 지진데이터가 충분하지 않아 서부 지역의 경험식을 이용하여 변환할 수 있는 식을 제시하였다. WUS 및 EUS에 대한 스펙트럼 형상은 다음의 식으로 나타낼 수 있다[3].

$$\ln[SA(f)/PGA] = \frac{C_1}{\cosh(C_2 f^{C_3})} + C_4 \left[\frac{\exp(C_5 f)}{f^{C_6}} \right] \quad (3)$$

$$\ln[SA(f)/PGA] = \frac{C_1}{\cosh(C_2 f^{C_3})} + C_4 \left[\frac{\exp(C_5 f)}{f^{C_6}} + \frac{C_7 \exp(C_8 f)}{f^{C_9}} \right] \quad (4)$$

여기서, $C_1 \sim C_9$ 은 지진의 규모 및 거리에 따라 통계적으로 얻은 상수값으로 참고문헌 [3]에 제시된 값을 사용하였으며, $SA(f)$ 는 스펙트럴 가속도를 나타낸다. 또한 f 는 진동수를 나타낸다.

시나리오 지진에 대한 스펙트럼 형상 결정을 위해 본 연구에서는 PSHA 수행 시 사용된 지반운동 감쇄식 및 위의 두 식을 이용하여 가속도 스펙트럼을 작성하였다. 이 때 가속도 스펙트럼은 1g로 정규화한 값이며 각각의 시나리오 지진에 대한 스펙트럼 형상은 그림 2 ~ 4와 같다. 이때 시나리오 지진 1 및 2는 확률론적 시나리오 지진 방법에 의해 설정된 두 지진을 나타내며 시나리오 지진 3은 활성단층 변위에 의한 시나리오 지진을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 지반운동 감쇄식을 사용하여 작성한 스펙트럼 형상은 저진동수 영역에서는 EUS의 1-Corner 진동수 모델의 형상과 비교적 유사하며 고진동수 영역에서는 WUS 모델에 비해서는 매우 큰 값을 보여주고 있으며 대체적으로 EUS 모델에 비해서도 큰 증폭특성을 보여주고 있다.

4. 근거리지진의 영향

세계적으로 지진으로 인한 인명 및 재산상의 피해사례는 어렵지 않게 찾아볼 수 있다. 그러나 최근 들어 단층과 인접한 지역에서의 대규모 지진에 의해 발생한 피해는 과거의 피해에 비해 매우 크게 나타나 근거리 지진에 대한 관심이 고조되었다. 최근 발생한 1994년 Northridge 지진을 비롯하여 Kobe 지진(1995년), Chi-Chi 지진(1999년), Kocaeli 지진(1999년) 등의 대규모 지진으로 인해 많은 인명 및 재산상의 피해가 보고된 바 있으며, 이들 지진의 특징은 피해지역이 지진을 발생시킨 활성단층과 매우 인접되어 있어 그

피해가 매우 컸으며 과거의 내진설계기준에 따라 설계된 구조물의 피해도 매우 큰 것으로 보고되고 있다는 것이다[9].

이는 근거리 지진(Near-Field Earthquake 또는 Near-Fault Earthquake)이 가지는 지진파의 특성이 과거 설계기준에서 제시하고 있는 입력지반운동이나 원거리 지진과 다른 특성을 가지고 있기 때문이다. 근거리 지진은 단층의 활동으로 인해 지진발생 초기에 펄스(Pulse) 형태의 매우 큰 속도성분을 가지고 있으며 그에 따른 변위도 매우 크게 나타났다. 과거에 발생한 근거리 지진에서는 변위가 0.5 ~ 1.5m로 나타났으며 그 이상의 변위를 보인 경우도 있다. 또한 속도성분에 있어서도 최대속도가 0.5m/sec 이상의 매우 큰 값을 보여주었다[10]. 이는 일반적인 원거리 지진에 비해 동일한 가속도를 갖는 경우 속도 및 변위 성분이 매우 큰 값을 보여주는 것으로 지진파가 가지는 에너지가 매우 크다고 할 수 있다.

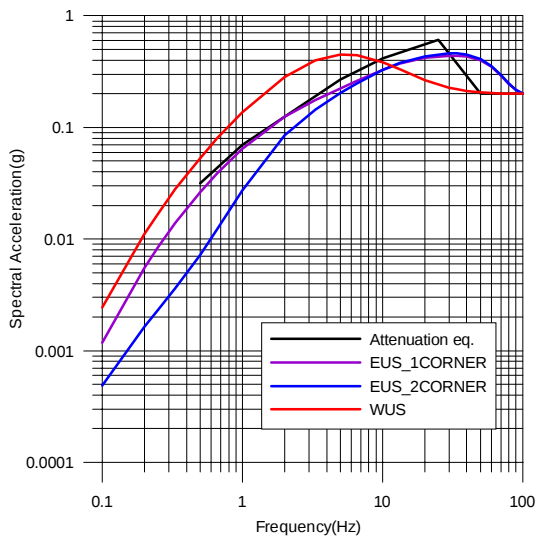


그림 2. 시나리오지진 1에 대한 스펙트럼

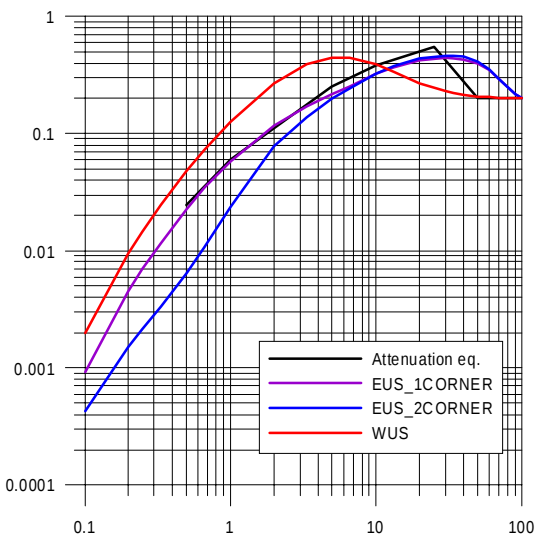


그림 3. 시나리오지진 2에 대한 스펙트럼

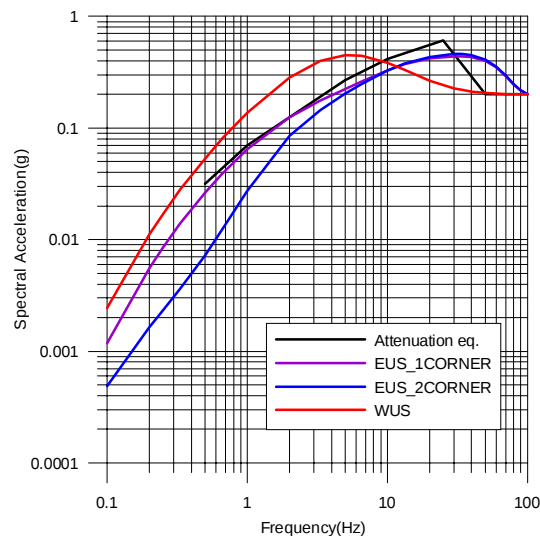


그림 4. 시나리오 지진 3에 대한 스펙트럼

근거리 지진에 대한 연구는 세계적으로도 아직 초기 단계에 있으며 원전 시설에 미치는 근거리 지진의 영향에 대한 연구는 극히 미미한 실정에 있다. 근거리 지진의 특성에 영향을 미치는 활성단층의 특성, 단층활동의 방향성(Directivity), Fling의 영향 등에 대한 연구가 미국, 일본 및 터키 등을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 구조물에 대한 영향을 평가하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다.

우리나라에서는 최근 월성 원전 주변의 여러 단층에 대해 활성단층이라는 주장이 제기된 바 있으며 이에 따라 활성단층 주변에 위치한 원전의 내진안전성에 대한 관심이 크게 증폭되고 있다. 이들 단층이 활성단층으로 판명될 경우 이들 단층에서 발생하는 근거리 지진에 의한 원전 구조물 및 기기의 내진안전성에 대한 재평가가 필수적으로 수행되어야 하겠다.

본 연구에서는 이러한 근거리 지진의 영향을 고려할 수 있는 방안을 조사 검토하고 앞에서 작성한 시나리오 지진의 스펙트럼 형상을 수정함으로써 근거리 지진의 영향을 고려한 스펙트럼 작성방법에 대해 기술하고자 한다.

근거리 지진의 일반적 특성으로는 단층운동의 방향성(Directivity)과 Fling의 영향으로 대별할 수 있다. 그 외에 역단층이나 정단층과 같은 Dip-Slip Fault에서 발생할 수 있는 상반(Hanging Wall)의 영향을 들 수 있다[11].

앞서 기술한 바와 같이 근거리지진은 일반적인 원거리 지진과는 다른 특성을 다양하게 내포하고 있다. 이러한 근거리 지진의 영향을 설계스펙트럼 등에 고려하기 위하여 과거에 발생한 근거리 지진 기록들을 이용한 특성 평가 연구가 다수 이루어져 왔다.

Abrahamson[12]은 Chi-Chi 지진 및 터키지진 등의 자료를 이용하여 각종 근거리 지진의 특성을 평가하였으며, Ohno[13] 등은 미국과 일본에서 최근 발생한 19개의 근거리 지진기록을 이용하여 근거리지진의 특성을 평가하였다. 근거리 지진의 특성 중 스펙트럼의 형상에 가장 큰 영향을 미치는 단층의 방향성에 의한 영향(Near Fault Rupture Directivity; NFRD) 영향을 평가하고 이를 설계스펙트럼에 고려할 수 있는 방안을 제시하였다. 그림 5에 FN(Fault Normal) 성분 및 FP(Fault Parallel) 성분의 스펙트럴 비를 보여주고 있다. 그림 5의 (1)은 연구에 사용된 모든 데이터의 스펙트럴 비를 보여주고 있으며 그림 5의 (2)에서는 전체 자료의 평균 및 표준편차를 보여주고 있다. 또한 그림 5의 (3)~(5)는 각각의 지진별 스펙트럴 비의 평균을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 FN 성분의 스펙트럴 값이 FP 성분에 비해 장주기 영역에서 크게 증폭되고 있음을 알 수 있다. 그림에서 SS는 Strike-Slip Fault, DS는 Dip-Slip Fault, OS는 Oblique-Slip Fault를 각각 나타낸다.

이와 같은 근거리 지진의 지진파가 가지는 특성을 스펙트럼에 반영하기 위한 수정계수를 산정하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 Ohno 등[13]에 의해 제시된 아래 식들을 이용하여 수정계수를 산정하여 스펙트럼을 수정하는 방법을 채택하였다.

$$\lambda(T_i)=1 \quad (T_i \leq T_D) \quad (5)$$

$$\lambda(T_i)=10^{\log(2.5) \cdot \log(T_i/T_D)/\log(T_H/T_D)} \quad (T_D < T_i) \quad (6)$$

여기서, T_i 는 주기를 나타낸다. 또한 T_D 및 T_H 는 설계스펙트럼의 통제점(Control Point)을 나타내며 각 5초, 0.33초가 사용되었다. 이 값은 일본에서 사용되고 있는 설계스펙트럼에 대한 것으로 본 연구에서는 이 값을 그대로 활용하였다.

위의 식을 사용하여 각 진동수별 수정계수를 산정한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 저진동수 영역에서의 스펙트럴 가속도 증폭을 적절히 나타내고 있음을 알 수 있으며 Ohno 등의 연구에서 보여준 그림 5의 결과[13]를 적절히 반영해줄 수 있음을 알 수 있다.

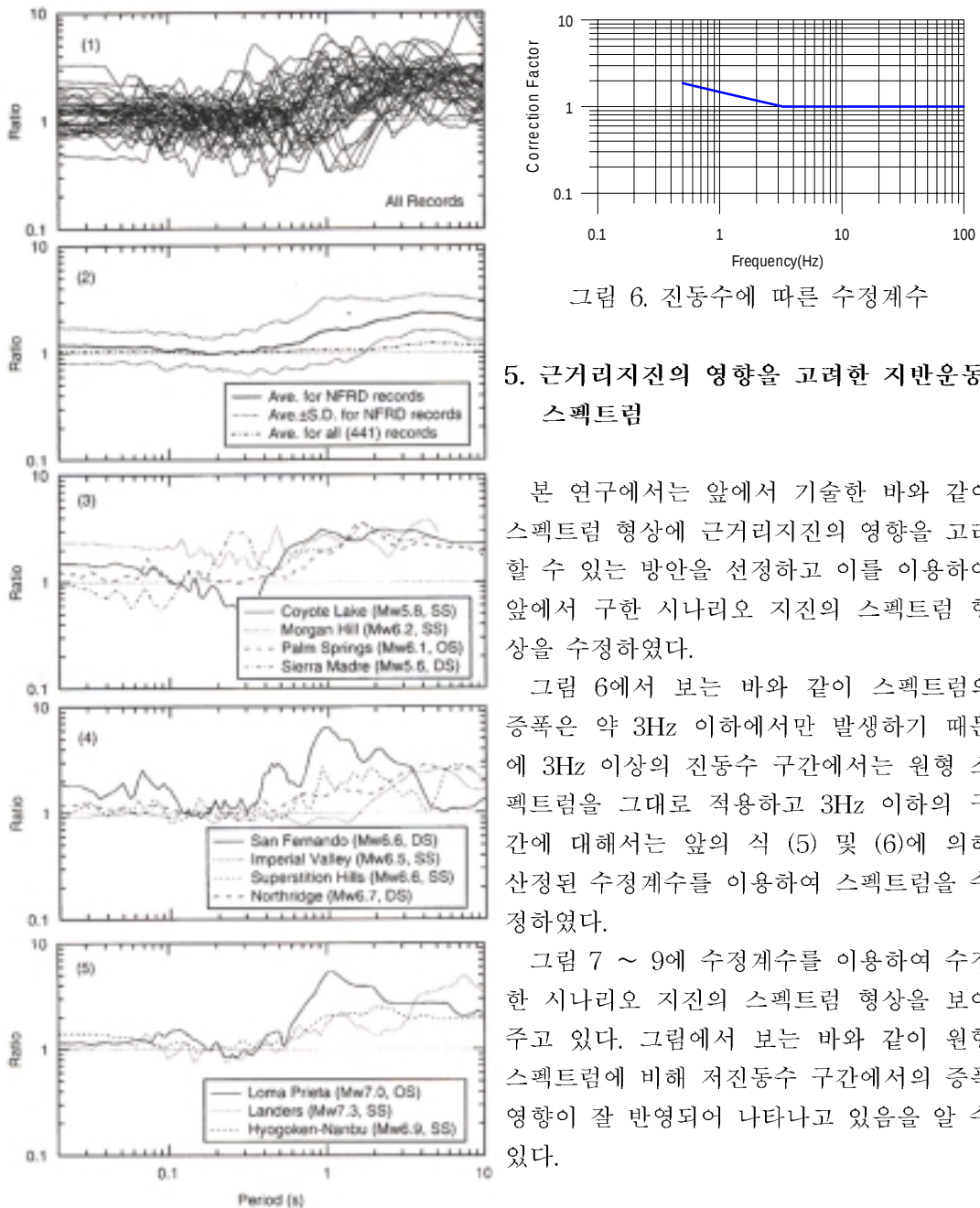


그림 6. 진동수에 따른 수정계수

5. 근거리지진의 영향을 고려한 지반운동 스펙트럼

본 연구에서는 앞에서 기술한 바와 같이 스펙트럼 형상에 근거리지진의 영향을 고려할 수 있는 방안을 선정하고 이를 이용하여 앞에서 구한 시나리오 지진의 스펙트럼 형상을 수정하였다.

그림 6에서 보는 바와 같이 스펙트럼의 증폭은 약 3Hz 이하에서만 발생하기 때문에 3Hz 이상의 진동수 구간에서는 원형 스펙트럼을 그대로 적용하고 3Hz 이하의 구간에 대해서는 앞의 식 (5) 및 (6)에 의해 산정된 수정계수를 이용하여 스펙트럼을 수정하였다.

그림 7 ~ 9에 수정계수를 이용하여 수정한 시나리오 지진의 스펙트럼 형상을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 원형 스펙트럼에 비해 저진동수 구간에서의 증폭 영향이 잘 반영되어 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 5. FN과 FP 성분의 비교[13]

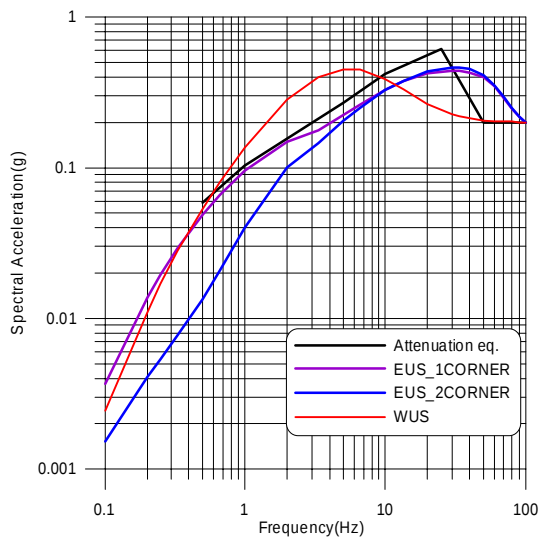


그림 7. 근거리지진의 영향을 고려한
시나리오 지진 1의 스펙트럼

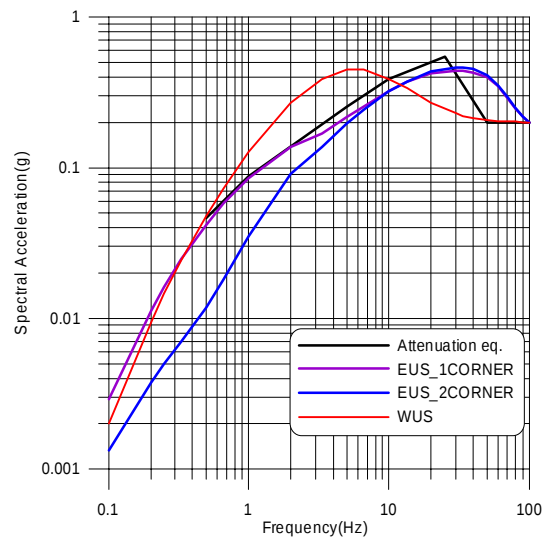


그림 8. 근거리지진의 영향을 고려한
시나리오 지진 2의 스펙트럼

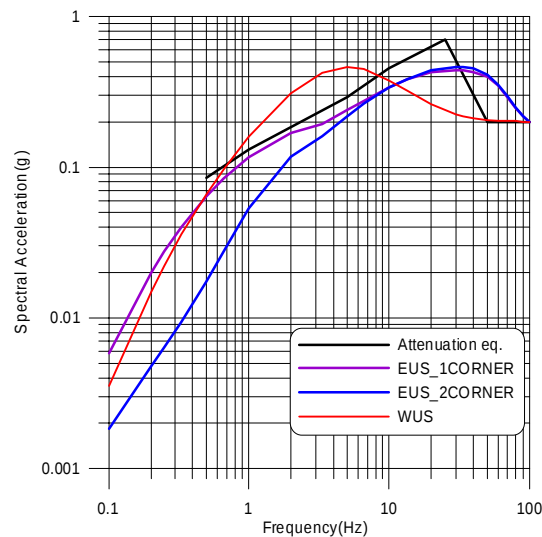


그림 9. 근거리지진의 영향을 고려한 시나리오 지진 3의 스펙트럼

6. 결론

본 연구에서는 확률론적 지진재해도 결과를 이용한 확률론적 시나리오지진 및 단층 변위에 대한 시나리오 지진에 대해 지진재해도 해석 시의 지반운동 감쇄식을 이용하여 스펙트럼 형상을 작성하고 이를 미국 서부 및 중동부 지역에 제시된 경험식에 의한 형상과 비교하였다. 또한 근거리지진의 영향을 고려하여 스펙트럼 형상을 수정하였다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 지진재해도 분석결과를 이용한 시나리오 지진에 의해 안전정지지진의 스펙트럼 형상을 결정하는 것이 바람직하며 이를 위해서는 시나리오 지진의 설정에 필요한 자료를

지진재해도 분석에 충분히 반영하여 수행하는 것이 바람직하다.

- 설정된 시나리오 지진에 대해 지반운동 감쇄식 및 미국 NRC의 스펙트럼 형상식을 적용하여 스펙트럼을 작성한 결과 감쇄식에 의한 형상이 미국 동부지역에 대한 스펙트럼 형상과 유사하게 나타났다.
- 근거리 지진의 영향을 고려하기 위해 NFRD 영향을 스펙트럼 형상에 수정계수로 고려하여 시나리오 지진에 대한 스펙트럼을 수정하였다. 이러한 방법은 근거리지진의 특성을 설계지진 등의 결정에 효과적으로 고려할 수 있는 방법으로 판단된다.
- 추후 활성단층에 의한 시나리오 지진의 설정을 위해서는 단층에 대한 명확한 규명과 관련 자료의 확보가 요구되며 추후 단층 자료에 의한 최대발생가능 지진의 추정방법 등에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. US NRC Regulatory Guide 1.165, Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, 1997.
2. 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, 1997.
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. 한국원자력연구소, 지진재해도 평가의 불확실성 개선에 관한 연구, KAERI/CR-65/99, 1999.
5. 한국수력원자력(주), 원전부지 지진안전성 정밀평가 기술개발 (중간보고서), 2002.
6. 活斷層研究會, 新編日本の活斷層-分布圖と資料-, 東京大學出版會, 1991.
7. 松田時彦, 活斷層から發生する地震の規模と周期について, 地震 第2輯 第28卷, 1975.
8. Y., Ishikawa, and H. Kameda, “Scenario Earthquakes vs. Probabilistic Seismic Hazard, Proc. of Forth International Conference on Structural Safety and Reliability, Vol. 3, 1993.
9. Babak Alavi and Helmut Krawinkler, “Effects of Near-Field Ground Motion on Building Structures,” CUREE-Kajima Joint Research Program Phase III, 2001.
10. P. B. Rao and R. S. Jangid, “Performance of Sliding Systems under Near-Fault Motions,” Nuclear Engineering and Design, 203, 2001.
11. Paul Somerville, “Characterization of Near-Fault Ground Motions,” U.S.-Japan Workshop on the Effects of Near-Field Earthquake Shaking, San Francisco, California, pp. 21-29, 2000.
12. N. Abrahamson, Incorporating Effects of Near Fault Tectonic Deformation into Design Ground Motions, <http://civil.eng.buffalo.edu/webcast/abrahamson/>.

13. S. Ohno, M. Takemura, and Y. Kobayashi, "Effects of Rupture Directivity on Near-Source Strong Motion, Proc. 2nd Int. Sym. on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 1998.