지진특성에 따른 구조물의 지진응답실험

Experimental Study on the Seismic Structural Responses Subjected to Different Earthquakes

최인길* 김형규** 김민규* 전영선***
Choi, In-Kil Kim, Hyung-Kyu Kim, Min-Kyu Choun, Young-Sun

ABSTRACT

Near-field ground motions exhibit special characteristics that are different from ordinary far-field ground motions. In this study the shaking table tests were conducted to evaluate the effect of earthquake ground motions with different characteristics on the response of the structure. The ground motions used in this study were the scenario earthquake, design earthquake, and Chi-Chi earthquake measured in TCU052 station. These earthquakes have different frequency contents. The test results show that the frequency content of ground motion is very important to the response of structures. The floor responses of structure were greatly affected by the higher modal frequencies, as well as the fundamental frequency. The responses of third floor were significantly reduced due to the interaction between the structure and the base isolated mass installed at the third floor.

1. 서론

근래에 발생한 Kobe 지진, Chi-Chi 지진 등 대규모 지진으로 인해 많은 인명 및 재산상의 피해가 발생하였다. 지진을 발생시킨 활성단층과 인접해 있었던 이들 피해지역에서는 과거 내진설계기준에 따라 설계된 구조물도 상당한 피해를 입은 것으로 나타났다[1]. 이는 활성단층대와 인접한 지역에서 발생하는 근거리 지진(Near-Field Earthquake 또는 Near-Fault Earthquake)이 가지는 지진파의 특성에 기인하는 것으로 과거 설계기준에서 제시하고 있는 입력지반운동이나 원거리 지진과 다른 특성을 가지고 있기 때문이다. 근거리 지진의 가장 큰 특징은 단층활동과 관련하여 지

* 한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사, 정회원
** 한국원자력연구소 종합안전평가부 학연과정, 학생회원
*** 한국원자력연구소 종합안전평가부 책임기술원, 공학박사, 정회원

진발생 초기에 나타나는 펄스(Pulse)형태의 큰 속도성분과 그에 따른 지반의 영구변위를 보인다는 것이다. 따라서 일반적인 원거리 지진에 비해 동일한 가속도를 갖는 경우 속도 및 변위성분이 매우 큰 값을 보여주는 것으로 지진파가 가지는 에너지가 매우 크다고 할 수 있다[2]. 이와 같은 특징을 가지는 근거리 지진에 대한 연구는 세계적으로도 아직 초기 단계에 있으며 특히 원전 시설에 미치는 근거리 지진의 영향에 대한 연구는 극히 미미한 실정에 있다. 국내에서는 근거리 지진이 원전 구조물 및 시설에 미치는 영향을 논의하기 위한 워크샵이 최근 개최된 바 있으며[3] 이에 대한 연구가 국제공동연구 등의 형태로 활성화되고 있는 시점에 있다.

한편, 우리나라에서는 최근 월성 원전 주변의 여러 단층에 대해 활성단층이라는 주장이 제기된 바 있으며 이들 단층에 대한 조사 및 연구가 진행되고 있다[4]. 이에 따라 단층 주변에 위치한 원전의 내진안전성에 대한 관심이 크게 증폭되고 있으며 이들 단층이 활성단층으로 판명될 경우 이들 단층에서 발생되는 근거리 지진에 의한 원전 구조물 및 기기의 내진안전성에 대한 재평가가 필수적으로 수행되어야 하겠다.

본 연구에서는 입력지진의 특성에 따른 구조물의 거동을 실험적으로 평가하기 위해 철골 프레임 구조물에 진동수 성분이 서로 다른 입력지진이 작용할 경우의 응답을 진동대 실험을 통하여 평가하였다. 이를 통하여 원전 구조물 및 기기의 설계 여유도와 입력지진동 특성에 따른 안전성 평가에 활용할 수 있는 기본 자료를 확보하고자 한다.

2. 근거리지진 특성 및 입력지진 선정

2.1 근거리지진의 일반적 특성

근거리 지진의 일반적인 특성은 지진파의 초기에 펄스형태로 나타나는 장주기를 갖는 매우 큰 속도성분으로 대변할 수 있다. 이러한 펄스형태의 운동은 큰 에너지를 가지고 있어 구조물에 큰 피해를 발생시킬 수 있으며 특히 펄스의 주기와 근접한 고유주기를 갖는 구조물의 경우 구조물의 응답이 급격히 증가하게 된다. 근거리 지진에서 이러한 큰 속도성분을 갖는 주된 원인은 단층운동의 방향성(Directivity)과 Fling의 영향으로 대별할 수 있다[5].

단층운동의 방향성은 단층의 활동(Fault Rupture)이 어떤 방향으로 발생하는가에 따라 구분할 수 있는데, 단층의 활동이 임의 지역을 향하여 진행하면 그 지역에서의 지진기록은 전방향성(Forward Directivity)으로 정의하며, 이러한 활동의 진행은 부지의 전단파 속도에 근접한 속도로 발생하며 지진 초기에 매우 짧은 지속시간을 갖는 펄스운동을 발생시킨다. 단층의 활동이 임의 지역으로부터 멀어지는 방향으로 진행하면 그 지역에서의 지진기록은 후방향성(Backward Directivity)을 나타낸다. 이러한 지진기록은 긴 주기의 작은 진폭을 가지고 긴 지속시간 동안 운동한다.

Fling의 영향은 영구적인 지반 변형에 의해 발생되는 것으로 큰 속도의 펄스운동을 발생시키는 원인이 된다. Fling에 의한 속도 펄스는 한 방향으로 큰 속도를 발생시키며 진앙의 위치와는 무관하게 단층 활동이 발생한 근처에서 발생한다.

2.2 입력지진동의 선정

입력지진동의 특성에 따른 구조물의 거동특성을 실험적으로 평가하기 위해 본 연구에서는 서로 다른 진동수 특성을 갖는 세 가지 지진동을 입력지진동으로 선정하였다. 먼저 원전 구조물 및 기기의 설계에 사용되는 설계지진과 우리나라 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석결과로부터 추정한 시나리오 지진 및 실제 근거리 지진기록을 선정하였다.

우리나라 원전 구조물 및 기기의 설계에는 일반적으로 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 제시하고 있는 Regulatory Guide 1.60[6]의 표준응답스펙트럼을 사용하여 왔다. 이 표준응답스펙트럼은 강지진대에 속하는 미국 서부에서 발생한 강진기록을 이용하여 작성한 것으로 미국 동부지역이나 우리나라의 지진재해도 분석 결과에 따른 지진특성과 비교하여 볼 때 저진동수 성분에서 매우 큰 보수성을 가지고 있으나 고진동수 성분에서는 저평가 되어 있는 것으로 평가되고 있다. 이는 미국 서부의 충적층 지반에서 측정된 한정된 지진자료를 이용하여 작성된 것이기 때문이며 미국 서부지역의 암반지반에서 조차도 10Hz 이상의 진동수대에서 저평가 되어 있는 것으로 나타났다[7].

두 번째 입력지진으로는 우리나라 원전 부지의 확률론적 지진재해도 분석 결과를 재분해하여 선정한 시나리오 지진을 선정하였다. 시나리오 지진의 작성은 미국 NRC Regulatory Guide 1.165[8]에서 제시한 절차에 따라 산정하였으며 이 때 시나리오 지진은 지진의 규모와 진앙거리로 나타나게 된다. 이러한 시나리오 지진(M6.4, 9km)에 대한 응답스펙트럼은 지진재해도에서 사용한 가중치가 부여된 일련의 지반운동감쇄식[9]으로부터 작성하였으며 시나리오 지진의 진앙거리가 매우 작게 나타나 입력 스펙트럼 형상에 NFRD(Near Fault Rupture Directivity) 영향을 고려하여 수정한 스펙트럼을 사용하였다[10,11,12]. 이상의 두 지진에 대하여 이들 응답스펙트럼에 부합하는 인공지진 가속도 시간이력을 SIMQKE[13] 프로그램을 이용하여 작성하였다.

단층 주변에서 발생하는 대규모 피해 발생의 영향을 고려하기 위하여 세 번째 입력지진으로 실제 근거리 지진기록인 Chi-Chi 지진의 기록을 이용하였다. 이 지진기록은 Chi-Chi 지진의 TCU052 지진기록으로 지진의 특성은 다음의 표 1과 같다.

표 1. Chi-Chi 지진 TCU052 기록의 특성

Station No.	Epicentral Distance (km)	Distance from Rupture (km)	PGA (gal)			PGV (cm/sec)			PGD (cm)		
			UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW
TCU052	38.38	1.84	193.98	436.68	348.66	168.70	220.70	183.20	168.70	220.70	183.20

이들 세 가지 입력지진동에 대한 응답스펙트럼을 그림 1에 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 시나리오 지진의 경우 우리나라 지진특성이 반영되어 고진동수 성분에서의 증폭이 매우 크게 나타나고 있으며 Chi-Chi 지진기록의 경우 1Hz 이하의 저진동수 영역에서 매우 큰 증폭을 보여주고 있어 근거리지진의 특성이 잘 나타나고 있다. 또한 원전의 설계지진으로 사용되고 있는 표준응답스펙트럼에 의한 지진은 전체 진동수 구간에서 비교적 큰 증폭을 보여주고 있으며 나머지 두 지진동의 중간형태라고 볼 수 있다.

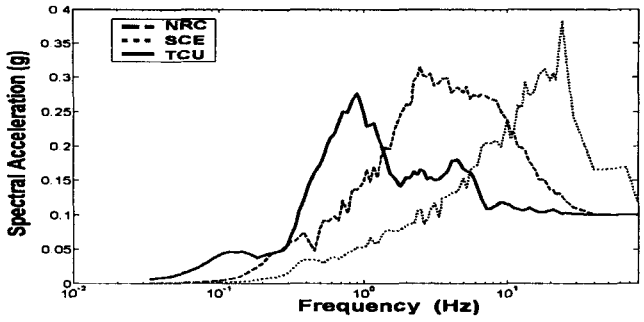
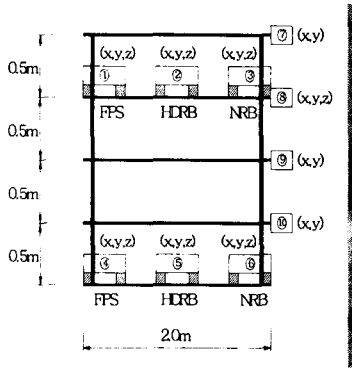


그림 1. 입력지진동 응답스펙트럼의 비교

3. 실험 모델 및 진동대 실험

3.1 실험모델의 설계 및 제원

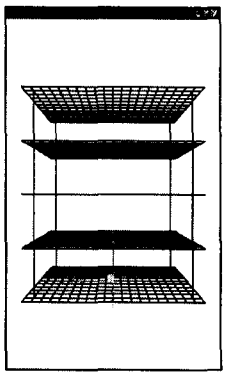
본 연구에서는 입력지진동의 특성에 따른 원전 시설의 거동특성을 평가하기 위하여 진동대 실험을 수행하였다. 일반적으로 원전 시설 내에 건설된 구조물의 경우 프리스트레스 철근 콘크리트 구조물을 비롯하여 철골 구조물, 강재 탱크 등 구조물의 형상 및 제원이 매우 다양하여 광범위한 고유진동수 특성을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 원전 시설 중 대표적인 구조물이라고 할 수 있는 격납건물을 대상으로 하여 격납구조물의 고유진동수와 유사한 모델을 철골 프레임 구조로 설계하여 사용하였다. 실제 원전 격납구조물은 프리스트레스 철근 콘크리트 구조물로 약 4.0Hz의 고유진동수를 가지고 있으며[14] 본 연구에서는 구조물의 고유진동수 특성에 따른 거동 특성 평가를 수행하기 위해 이와 유사한 진동수 특성을 갖는 구조물을 설계하였다. 그림 2에 실험에 사용된 구조물의 형상 및 제원을 보여주고 있으며 표 2에 모델 제작에 사용된 재료의 특성치를 보여주고 있다. 또한 바닥층 및 3층에는 별도 목적의 실험을 위해 부가질량이 설치되어 있으며 이는 구조물의 거동실험을 위한 목적으로 사용된 것은 아니며 구조물의 고유진동수 추정에는 고려하였다.



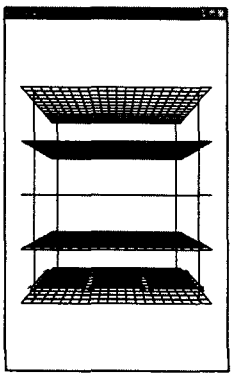
(a) 실험모형

(b) 사진

그림 2. 실험모델의 형상, 제원 및 계측위치



(a) 구조물



(b) 구조물+면진기기

그림 3. 해석모델

표 2. 실험모델 재료 특성

항목	직경 (cm)	두께 (cm)	탄성계수 (ton/m^2)	단위중량 (ton/m^3)
강관기둥	4.27	0.36	2.039E7	7.9
슬래브		4.0	2.039E7	7.9

표 3. 각 모드별 진동수

모드	구조물	구조물+면진기기
1	4.474 (Hz)	3.222 (Hz)
2	13.151 (Hz)	13.158 (Hz)

3.2 진동대실험 방법 및 계측

진동대 실험을 위한 순서는 실험모델의 고유진동수 및 응답 추정을 위한 예비해석을 통하여 결정하였다. 가진을 위한 지진동의 크기는 0.1g를 시작으로 0.5g~1.0g의 간격으로 증가시켰으며 입력지진의 순서는 모델의 누적손상을 방지하기 위해 응답의 크기가 작을 것으로 예상되는 것부터 차례로 가진 하였다. 각각의 입력지진 수준별로 가장 손상이 작을 것으로 예상되는 시나리오 지진을 가장 먼저 입력하였으며 그 다음으로는 TCU052 지진기록, 마지막으로 표준응답스펙트럼에 의한 인공지진을 이용하여 수평 1방향, 수평 2방향 및 3방향 가진 실험을 수행하였다. 또한 각 입력지진 수준별 실험을 수행하기 전에 모델의 구조적 손상 여부를 판단하기 위하여 랜덤진동 시험을 수행하였다. 이상의 절차에 따라 진동대 시험을 수행하였으며 최종적으로 0.25g 이상의 가속도 수준에서는 TCU052 입력지진의 경우 변위가 진동대의 한계를 초과하는 관계로 0.25g 까지 실험을 수행하였다.

모델 구조물의 응답을 계측하기 위하여 각 층에서의 수평 2방향 응답을 가속도계를 이용하여 측정하였으며 3층에서의 수직응답 가속도를 별도로 측정하였다. 또한 바닥면에서 3방향 입력 성분을 측정하였다. 계측위치 및 성분은 그림 2에 나타낸 바와 같다.

4. 결과분석

4.1 모델 구조물의 고유진동수

실험모델에 대한 예비해석은 면진기기 없는 상태와 면진기기가 포함된 상태에 대하여 수행하였다. 해석모델은 그림 3에, 해석결과는 표 3에 나타내었다. 또한 면진기기가 설치된 실제 구조물에 대한 Modal Test를 수행하여 얻은 전달함수를 그림 4에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 해석결과와 Modal Test결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

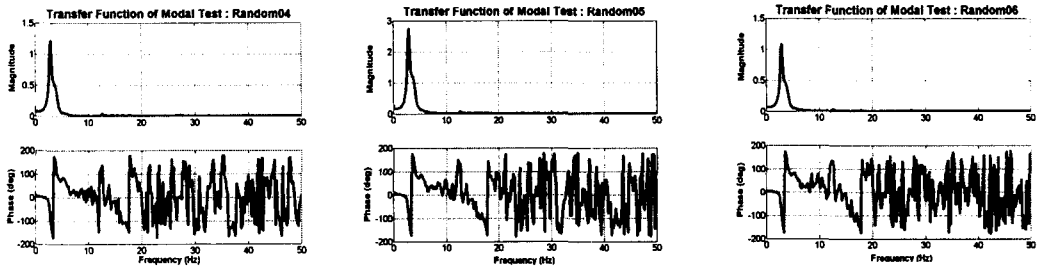


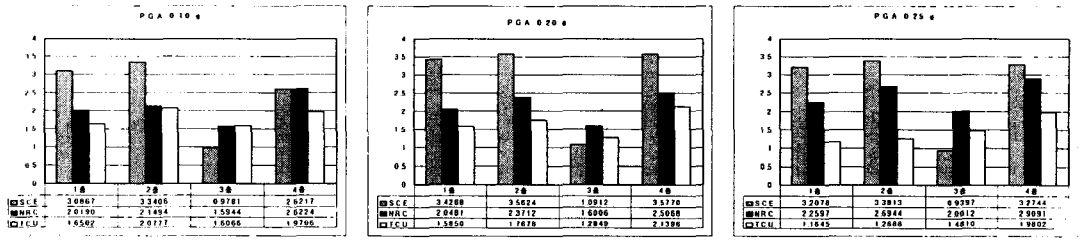
그림 4. Modal Test에 의한 주파수 응답 함수

4.2 층별 가속도 응답

실험 결과의 분석을 위하여 지진 종류와 수준별 X방향 가진에 대한 층별 X방향 가속도 응답을 표 4에 나타내었고 입력지진에 대한 구조물 각 층에서의 응답이 어느 정도 증폭이 되는지를 확인하기 위해 각 층 및 입력지진 수준별로 응답비를 계산한 것을 그림 5에서 도시하였다.

표 4. 진동대 실험결과 각 위치에서 계측된 X 방향 PGA (단위 : g)

	입력지진		층 응답			
	Target PGA	Real PGA	1층 응답	2층 응답	3층 응답	4층 응답
SCE	0.10	0.1327	0.4096	0.4433	0.1298	0.3479
	0.20	0.3222	1.1041	1.1478	0.3516	1.1525
	0.25	0.4144	1.3293	1.4012	0.3894	1.3569
NRC	0.10	0.1319	0.2663	0.2835	0.2103	0.3459
	0.20	0.2869	0.5876	0.6803	0.4592	0.7192
	0.25	0.3311	0.7482	0.8921	0.6626	0.9632
TCU	0.10	0.0849	0.1401	0.1764	0.1364	0.1673
	0.20	0.1576	0.2498	0.2786	0.2025	0.3372
	0.25	0.1921	0.2237	0.2437	0.2845	0.3804



(a) 0.10g 입력 (b) 0.20g 입력 (c) 0.25g 입력

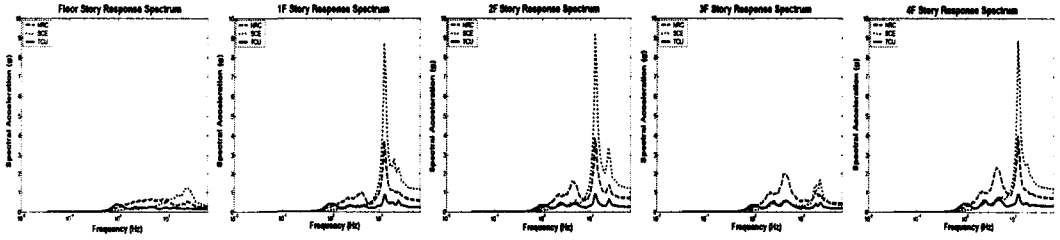
그림 5. 동일 수준의 입력에 대한 지진 및 층별 응답비

그림과 표에서 알 수 있듯이 응답비는 시나리오 지진이 다른 지진에 비해 전체적으로 크고 TCU 지진은 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이는 구조물의 1·2차 모드의 공진역이 약 3과 12Hz라는 것과 각 지진의 탁월 주파수가 SCE는 10Hz 이상, NRC는 2~8Hz, TCU는 1Hz 이하에서 발생한다는 것을 고려하면 1·2차 모드의 공진역에서 벗어난 TCU 지진의 응답이 전체적으로 작은 것은 합리적이라 판단된다. 그러나 흥미로운 것은 NRC 지진의 공진역은 1차 모드에 걸쳐 있고 근거리 지진의 특성이 포함된 SCE 지진의 공진역은 2차 모드에 걸쳐 있는 것이다. 따라서 일반적으로 입력지진에 대한 구조물의 응답이 1차 모드에 의해 지배된다면 1차 모드의 공진역에 걸쳐 있는 NRC 지진의 응답이 가장 클 것이라고 예측할 수 있지만 우리나라의 지진특성을 포함하여 고주파수 성분이 지배적인 시나리오 지진은 2차 모드 공진역의 영향이 상당히 커서 NRC 지진보다 응답비가 크게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 3층의 경우는 면진 기기와 그 중량이 질량 댐퍼(Damper)로써 작용함과 동시에 고주파수 성분을 흡수하여 구조물의 공진역이 저주파수 쪽으로 이동한 결과 NRC, TCU, SCE 지진 순으로 응답비가 역전이 되고 크기 또한 상당히 감소한

것을 알 수 있다. 실제 근거리 지진인 TCU 지진은 탁월 주파수가 1Hz 이하 부근에 있어서 본 구조물의 응답에는 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되며 구조물의 주기가 긴 경우는 다른 지진보다도 영향이 상당히 클 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 층응답 스펙트럼의 비교

다음으로 각 입력지진의 층별 응답 스펙트럼을 그림 7에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 저주파수 성분이 지배적인 TCU 지진은 약 1Hz 부근에서, 저주파수 영역에서 보수적인 것으로 알려진 NRC 지진의 응답보다 큰 값을 나타냈으며 이는 근거리 지진이 저주파수 구조물에 상당한 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. 고주파 성분이 지배적인 시나리오 지진의 경우는 구조물의 1차 모드의 영향은 미미하며 2차 고유 주파수인 약 12Hz 부근에서 공진역이 발생하여 큰 증폭을 나타낸다. NRC 지진의 경우는 1·2차 모드에서 공진역이 발생하여 두 저차 모드가 구조물의 응답에 지배적인 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 또한 NRC 지진에 의한 3층에서의 응답은 면진 기기의 영향으로 구조물의 공진역이 저주파수대로 이동하여 1차모드의 영향이 매우 크게 나타난 것을 볼 수 있다.



(Floor) (1층) (2층) (3층) (4층)

그림 5. 각 층에 대한 층 응답스펙트럼

5. 결론

본 논문에서는 세 종류의 지진특성에 대한 구조물의 응답을 진동대 실험을 통하여 분석하였으며 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 실제 근거리 지진인 TCU 지진은 원전 격납건물의 고유진동수와 유사한 본 실험모델에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 층별 가속도 응답을 비교한 결과 우리나라의 지진 특성을 포함한 시나라오 지진의 응답비가 다른 지진에 비해 크게 나타났다.
- 층 응답 스펙트럼을 비교한 결과 세 지진 모두 구조물의 1차 모드 보다도 2차 모드에 의해 상당한 영향을 받으며 이 중 구조물의 2차 모드에 공진역이 걸려있는 SCE 지진의 응답이 가장 크다.

- 면진 기기가 설치된 3층의 경우의 층 응답 스펙트럼은 면진 기기가 질량 댐퍼로써 작용하여 고주파수 성분을 흡수한 결과 공진역이 저주파수쪽으로 이동하여 다른 층에 비해 1차 모드가 구조물의 응답에 지배적으로 기여하고 있는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Babak Alavi and Helmut Krawinker, "Effects of Near-Field Ground Motion on Building Structures," CUREE-Kajima Joint Research Program Phase Ⅲ, 2001.
2. P. B. Rao and R. S. Jangid, "Performance of Sliding Systems under Near-Fault Motions," *Nuclear Engineering and Design*, 203, 2001.
3. Proceedings of OECD/NEA Workshop on the Relations Between Seismological Data and Seismic Engineering, 2002.
4. 한국수력원자력(주), 원전부지 지진안전성 정밀평가 기술개발 (중간보고서), 2002.
5. 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.
6. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
7. J. W. Reed, R. P. Kennedy, and B. Lashkari, Analysis of High-Frequency Seismic Effects, EPRI TR-102470, 1993.
8. US NRC Regulatory Guide 1.165, Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, 1997.
9. 한국원자력연구소, 지진재해도 평가의 불확실성 개선에 관한 연구, KAERI/CR-65/99, 1999.
10. In-Kil Choi, Young-Sun Choun, and Jeong-Moon Seo, "Scenario Earthquakes for Korean Nuclear Power Plant Site Considering Active Fault," SMiRT-17, K03-2, 2003.
11. 최인길, 전영선, 서정문, 연관희, "확률론적 지진재해도 결과를 이용한 시나리오 지진설정방법에 대한 고찰," 한국원자력학회 2002년 추계학술발표회, 2002.
12. 최인길, 전영선, 서정문, 김형규, "근거리지진 영향을 고려한 시나리오지진의 스펙트럼형상 결정, 한국원자력학회 2003년 춘계학술발표회, 2003.
13. E.H. Vanmarcke. et al., SIMQKE : A Program for Artificial Motion Generation, Department of Civil Engineering Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1976.
14. Wolsong 2 Nuclear Power Plant Design Report for Reactor Building Containment Structrue Stress Analysis, Design Report 8602-21020-0002-00-DR-A, Canatom Inc., 1994.