

근거리 지진의 지진파 특성 분석 Characteristics of Near-Field Earthquake Ground Motion

김형규

충남대학교

대전광역시 유성구 궁동 220번지

최인길, 전영선, 서정문

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

요 약

근거리 지진은 속도 및 변위 응답에서 일반 지진과는 다른 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 단층의 방향성과 단층의 수평 및 수직성분에 따른 근거리 지진의 특징을 검토한 후 근거리 지진에 대한 응답스펙트럼을 작성하고 이를 통계처리 하여 지진파 특성을 평가하였다. 또한 현행 원자력 구조물 설계기준인 Regulatory Guide 1.60 스펙트럼과 비교하여 평가하였다. 연구 결과 근거리 지진은 속도 및 변위응답스펙트럼이 저진동수 구간에서 매우 크게 나타났으며, 암반지반에서의 지진파는 고진동수 영역에서, 토양지반의 지진파는 저진동수 영역에서 큰 스펙트럴 가속도 값을 보여주었다. 따라서 원전 구조물 및 기기의 설계 뿐 아니라 내진 안전성 평가 시에는 근거리 지진에 대한 영향을 반드시 고려하여야 할 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The near-field ground motions exhibit special response characteristics that are different from those of ordinary ground motions in the velocity and displacement response. This study first examines the characteristics of near-field ground motion depending on fault directivity and fault normal and parallel component. And the response spectra of the near field ground motion are statistically processed, and are compared with the Regulatory Guide 1.60 spectrum that is present design spectrum of the nuclear power plant. The response spectrum of the near filed ground motions shows large spectral velocity and displacement in the low frequency range. The spectral accelerations of near field ground motion are greatly amplified in the high frequency range for the rock site motions, and in the low frequency range for the

soil site motions. As a result, the near field ground motion effects should be considered in the seismic design and seismic safety evaluation of the nuclear power plant structures and equipment.

1. 서론

최근 발생한 대규모 지진으로 인해 많은 인명 및 재산상의 피해가 보고된 바 있다. 특히 1994년 Northridge 지진을 비롯하여 Kobe 지진(1995년), Chi-Chi 지진(1999년), Kocaeli 지진(1999년) 및 Duzce 지진(1999년) 등에 의해 많은 인적, 경제적 피해를 입었다. 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[1].

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 변위량도 매우 크게 나타났다. 과거에 발생한 근거리 지진에서는 변위가 0.5 ~ 1.5m로 나타났으며 그 이상의 변위량을 보인 경우도 있다. 또한 최대속도는 0.5m/sec 이상의 매우 큰 값을 보여주었다 [2]. 이는 일반적인 원거리 지진에 비해 동일한 가속도를 갖는 경우 속도 및 변위성분이 매우 큰 값을 보여주는 것으로 지진파가 가지는 에너지가 매우 크다고 할 수 있다.

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. 따라서 본 연구에서는 과거에 발생한 근거리 지진 기록 중 데이터의 확보가 가능한 대표적인 근거리 지진 실측자료를 이용하여 근거리 지진의 지진파 특성을 분석하여 일반적인 지진파의 특성과 비교함으로써 추후 근거리 지진에 대비한 구조물 및 기기의 내진안전성 평가에 기초자료로써 활용하고자 한다.

2. 근거리 지진의 일반적 특성

근거리 지진의 일반적인 특성은 지진파의 초기에 나타나는 펄스형태의 매우 큰 속도와 큰 장주기 성분으로 대변할 수 있다[3]. 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)와 Fling의 영향으로 대별할 수 있다. 그 외에 역단층이나 정단층과 같은 Dip-Slip Fault에서 발생할 수 있는 상반(Hanging Wall)의 영향을 들 수 있다[4].

2.1 방향성(Directivity)

단층의 활동(Fault Rupture)이 어떤 방향으로 발생하는가에 따라 방향성을 구분할 수 있다. 단층의 활동이 임의의 지역을 향하여 진행하면 그 지역에서의 지진기록은 전방향성(Forward Directivity)로 정의하며, 이러한 활동의 진행은 부지의 전단과 속도에 근접한 속도로 발생하며 지진 초기에 매우 짧은 지속시간을 갖는 펄스운동을 발생시킨다. 1992년에 발생한 Landers 지진 시 단층 활동의 전방에 위치한 지역에서는 속도가 136cm/sec로 나타났으며 후방에 위치한 지역에서의 속도가 43cm/sec로 크게 차이가 나타나 이러한 지진의 방향성을 극명하게 보여주고 있다. 이러한 방향성은 Strike-Slip Fault 뿐 아니라 Dip-Slip Fault에서도 나타난다. 단층의 활동이 임의의 지역으로부터 멀어지는 방향으로 진행하면 그 지역에서의 지진기록은 후방향성(Backward Directivity)을 나타낸다. 이러한 지진기록은 긴 주기의 작은 진폭을 가지고 긴 지속시간 동안 운동한다.

지진의 방향성에 의한 영향은 주로 0.5초 이상의 장주기 영역에서 수평방향 응답스펙트럼을 증가시키게 되며 최대 스펙트럴 가속도의 발생 주기를 장주기 쪽으로 이동시키는 결과를 가져오게 된다. 지반운동의 방향성은 모든 지진에서 항상 일어나는 것은 아니며 1999년 발생한 Chi-Chi 지진에서는 방향성에 의한 영향이 나타나지 않았다. 이는 Chi-Chi 지진이 진원 깊이가 얕은 천발지진이 원인인 것으로 볼 수 있다.

일반적으로 전방향성을 보이는 지진기록이 후방향성을 보이는 지진기록들보다 PGA(Peak Ground Acceleration), PGV(Peak Ground Velocity), 그리고 PGD(Peak Ground Displacement) 값이 더 크다. 따라서 근거리 지진에 대한 일반적인 고려 대상은 전방향성을 갖는 지진기록들이며, 이러한 펄스형태의 지진특성을 반영하기 위해 전방향성을 갖는 지진기록들의 펄스 특성을 이용하여 기본적인 몇 개의 펄스 형태를 정의한 후 근거리 지진을 단순한 등가의 펄스로 치환하여 구조물에 대한 응답을 구하고 있다[1].

2.2 지반운동 성분

지반운동 성분은 단층면과 수직인 성분(Fault Normal)과 단층면과 수평인 성분(Fault Parallel)이 있다. 일반적으로 수직성분이 수평성분에 비해서 매우 큰데 이는 전단변위의 방사형 전파 패턴에 기인한다. 그러므로 단층 방향에 대한 구조물의 위치가 그 구조물이 단층의 활동에 의해 발생한 근거리 지진에서 경험할 수 있는 지반운동의 크기를 결정한다[1].

2.3 상반의 영향

정단층(Normal Fault)이나 역단층(Reverse Fault)과 같은 Dip-Slip Fault에서의 지진동의 특성은 앞서 기술한 방향성과 상반의 영향을 받게 된다. 상반의 영향으로 인해 정단

층이나 역단층에 의한 지진파의 단주기 성분이 Strike-Slip Fault에 비해 1.3~1.4배 정도 증가하게 된다[4]. Abrahamson과 Somerville[5]는 상반과 하반(Foot Wall)에서의 지반운동의 크기를 경험적으로 구분하여 제시하였다. 상반의 영향은 거리가 8~18km에 위치할 때 0~0.6초 구간에서 최대 1.45배가 차이 나게 되며 5초 이후에는 동일하게 된다[6].

2.4 Fling의 영향

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

현재까지 지진재해도 등에 사용되고 있는 지반감쇄식 (Attenuation)에서는 Fling에 의한 영향을 고려하고 있지 않으며 이를 위한 별도의 모델이 필요하다.

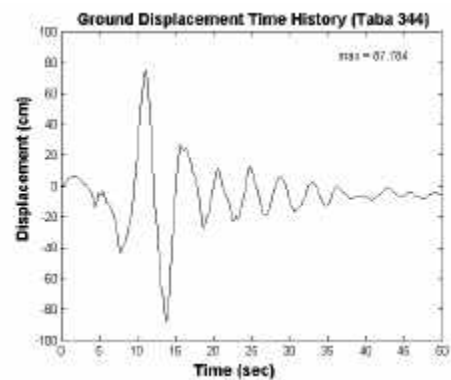
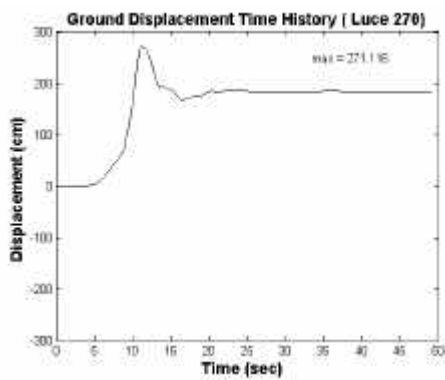
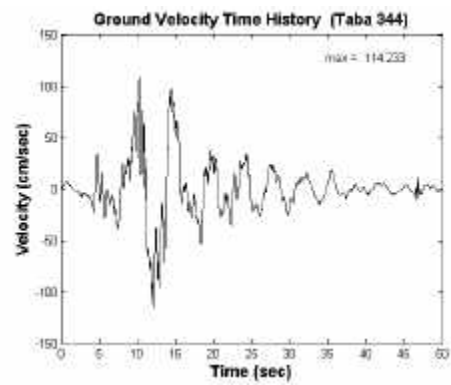
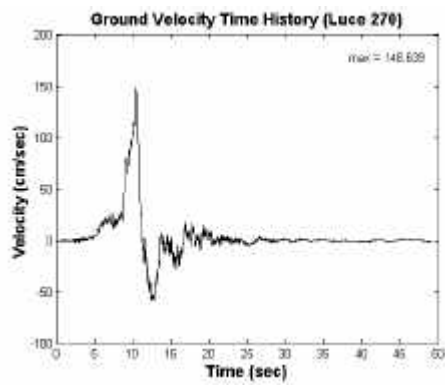
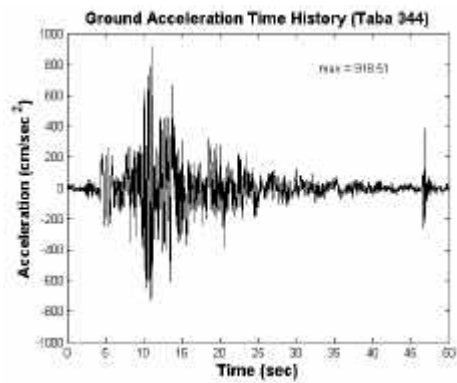
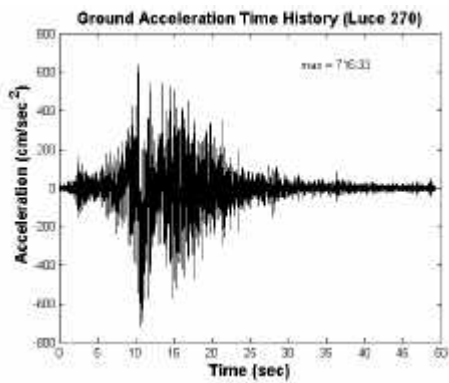
3. 근거리 지진파의 특성 분석

앞서 기술한 바와 같이 근거리 지진은 일반적으로 지진 발생 초기에 큰 속도의 펄스 형태의 운동을 가지고 있다. 먼저 근거리 지진파의 특성을 보기 위해 근거리 전방향성의 특징을 보이는 암반지반에 대한 1992년 Landers 지진과 Soil site에서 후방향성의 특징을 보이는 1978년 Tabas 지진에 대한 가속도, 속도 및 변위 시간이력을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 지진 발생 초기에 큰 속도성분을 갖는 펄스 형태의 지진파를 볼 수 있으며 변위성분이 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 Landers 지진에서는 지반의 영구변형이 크게 나타나는 Fling의 영향을 확인할 수 있다.

3.1 근거리 지진파 원거리 지진의 특성 비교

근거리 지진파 원거리 지진파의 특성을 비교하기 위하여 1999년 Chi-Chi 지진에서 계측된 데이터를 이용하여 지진파의 특성을 분석하였다. 표 1에 본 연구에서 선정한 Chi-Chi 지진의 기록을 측정점의 위치 및 특성을 각 방향 성분별 PGA와 함께 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 크게 근거리 지진파 원거리 지진에 대한 지진파를 선정하고 각각에 대해 상반 및 하반에 위치한 부지에서 측정된 데이터를 분리하여 평가하였다. 근거리 지진 및 원거리 지진으로 각각 8개의 측정자료를 이용하였으며 각각의 남북방향 및 동서방향 성분에 대한 가속도, 속도 및 변위스펙트럼을 평가하였다. 지진파의 특성 평가를 위해 각각의 지진 기록을 1g로 정규화하여 스펙트럼을 작성하였다.

그림 2에서는 근거리 지진 및 원거리 지진 각각에 대해 상반 및 하반에서 측정된 데이터를 구분하여 각각의 스펙트럼의 평균 스펙트럼을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 가속도, 속도 및 변위 응답 스펙트럼이 저진동수 영역에서 큰 차이를 보여주고 있으며, 근거리 지진의 경우 상반에서의 스펙트럼 값이 하반에서의 값에 비해 전체적으로 크게 나타났다. 그러나 원거리 지진의 경우 하반에서의 스펙트럼 값이 상반에 비해 전체적으로 크게 나타나 근거리 지진과 상반된 경향을 보여주고 있다. 이는 앞서 기술한 근거리 지진에서의 상반의 영향을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다.



(a) Landers Earthquake(Rock Site)

(b) Tabas Earthquake(Soil Site)

그림 1. Landers 지진 및 Tabas 지진의 시간이력

그러나 이와 같은 경향은 한정된 지진자료를 이용한 것으로 근거리 지진 및 원거리 지진의 특성을 대표한다고 할 수는 없으며 많은 지진자료를 이용한 추가적인 연구가 필요하다 하겠다.

지금까지 원자력 구조물에 대한 근거리 지진의 영향을 평가하기 위한 연구가 매우 미미하여 근거리 지진에 의한 원전 구조물의 거동 영향 평가나 설계 스펙트럼에 대한 비교평가가 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 기존의 원전 설계에 사용된 설계 스펙트럼과 본 연구에서 분석한 근거리 지진 데이터로부터 얻은 스펙트럼을 비교하였다.

그림 3에 근거리 지진의 개별적인 응답스펙트럼으로부터 구한 평균 응답스펙트럼을 우리나라 원전 구조물의 설계응답 스펙트럼인 US NRC Regulatory Guide 1.60[7]의 표준응답 스펙트럼과 비교하여 나타냈다. 그림 3에서 보는 바와 같이 근거리 지진에 의한 가속도, 속도 및 변위 응답 스펙트럼이 저진동수 구간에서 표준응답스펙트럼 보다 크게 나타났다. 그러나 2Hz 이상의 고진동수 구간에서는 표준응답스펙트럼이 매우 보수적으로 설정되어 있음을 알 수 있다. 따라서 원전 구조물 및 기기의 설계에서도 근거리 지진에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 근거리 지진이 갖는 특성을 반영하여야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서 분석한 자료는 측정위치에서의 지반조건을 무시하고 평가를 수행하였기 때문에 지반의 영향을 반영하지 못하고 있다. 그러나 실제 지반운동은 부지 특성에 따라 지진파의 전파 특성이 달라지므로 이에 대한 평가가 필요하다. 또한 본 연구에서 선정한 원거리 지진은 일반적인 원거리 지진에 비해 진앙이나 단층면에서 매우 근접된 지진기록으로 일반적인 원거리 지진에 비해 근거리 지진의 특성을 많이 내포하고 있는 것으로 평가할 수 있다. 따라서 기존의 연구결과[8]에서 볼 수 있는 현저한 차이를 보이고 있지는 않다.

표 1. Chi-Chi 지진기록의 종류 및 특성

Site	Location	Station No.	Epicentral Distance (km)	Distance from Rupture	PGA (gal)			PGV (cm/sec)		
					UD	NS	EW	UD	NS	EW
Near-Fault	Hanging Wall	TCU052	38.38	1.84	193.98	436.68	348.66	168.70	220.70	183.20
		TCU068	46.74	3.01	519.42	361.94	501.60	228.60	292.20	280.50
	Foot Wall	TCU065	25.57	2.49	257.80	563.22	774.42	68.56	90.04	132.40
		TCU067	27.60	1.11	230.58	312.66	488.86	50.36	56.05	97.40
		TCU075	19.70	3.38	223.88	257.32	325.34	50.04	37.17	116.20
		TCU076	15.25	3.17	275.38	420.02	340.10	32.67	63.02	69.28
		TCU102	44.33	1.19	173.28	168.98	298.36	71.15	71.90	87.27
TCU129	13.54	2.21	334.96	610.76	983.00	38.74	55.14	67.98		
Far-Fault	Hanging Wall	TCU074	18.70	13.75	270.18	368.40	585.94	24.95	48.86	70.22
		TCU078	5.96	8.27	171.00	302.48	439.70	18.29	32.27	44.92
		TCU079	8.28	10.95	383.82	416.95	579.78	22.87	31.08	67.49
	Foot Wall	TCU107	36.84	17.78	94.50	143.86	127.76	26.21	46.35	34.76
		TCU109	35.29	14.69	132.96	159.16	149.00	23.79	55.43	54.82
		TCU119	51.80	40.14	60.18	52.52	62.68	14.94	20.02	24.82
		TCU123	32.89	17.11	85.54	131.96	149.00	26.50	35.69	47.45
TCU145	49.59	-	52.10	60.24	69.56	-	-	-		

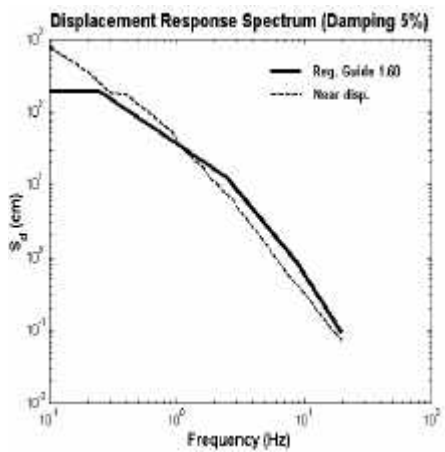
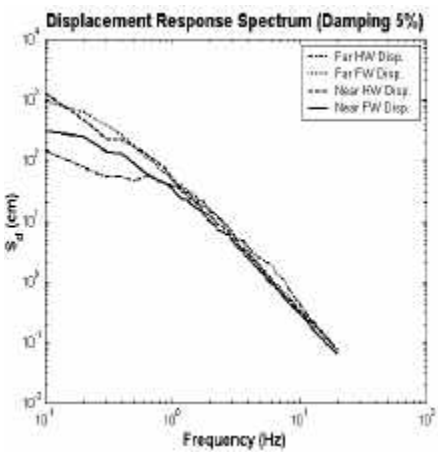
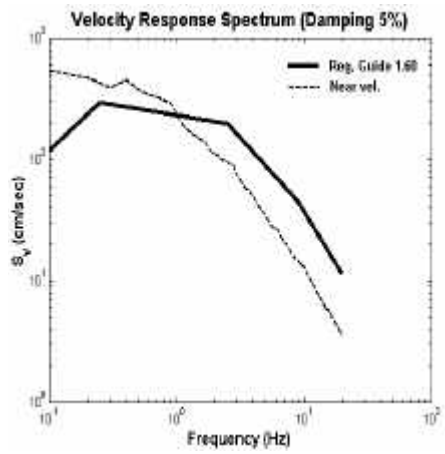
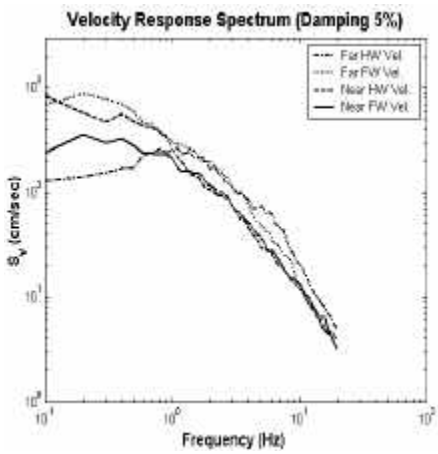
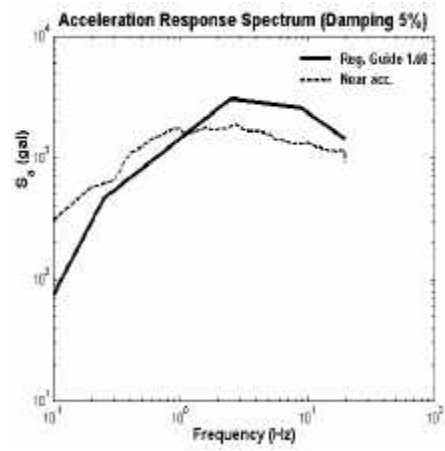
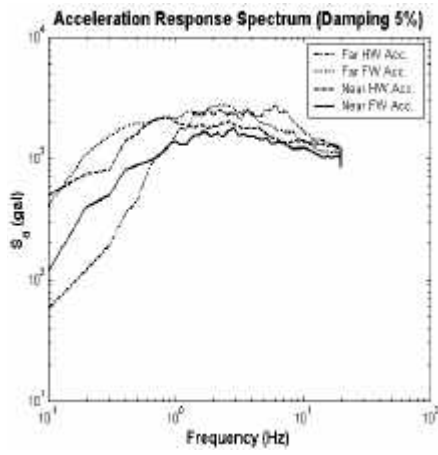


그림 2. 근거리 및 원거리 지진의 상반, 하반의 스펙트럼 비교

그림 3. 근거리 지진과 R.G. 1.60 스펙트럼 비교

3.2 지반특성에 따른 근거리 지진의 특성

본 연구에서는 지반특성에 따른 근거리 지진의 지진파 특성 분석을 위하여 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)에서 제공하고 있는 암반지반(Rock Site) 및 토양지반(Soil Site)에서 측정된 근거리지진 기록을 이용하였다. 이들 지진은 한정된 데이터베이스에서 선정된 것으로 근거리지진을 대표한다고는 할 수 없으나 비교적 양질의 데이터로서[9] 본 연구의 목적에 적합한 것으로 판단되어 이들 지진자료를 이용하였다.

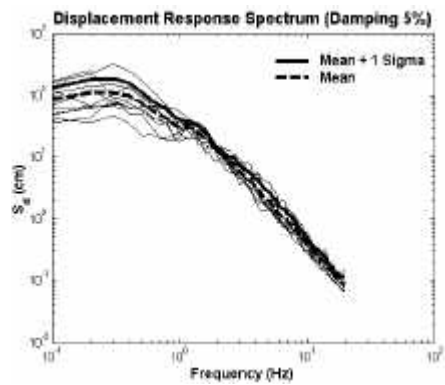
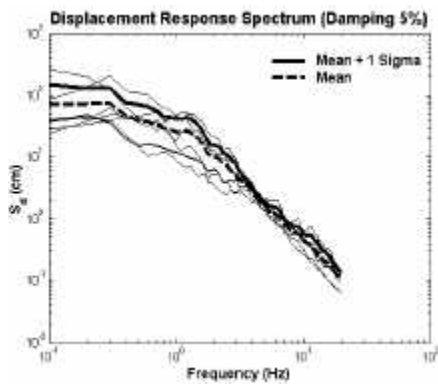
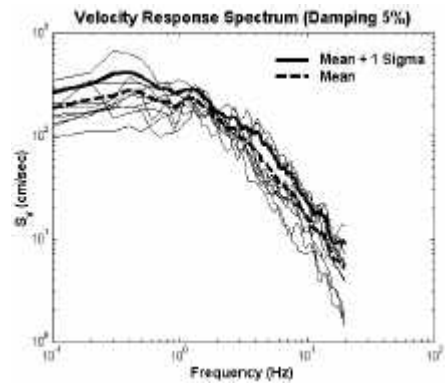
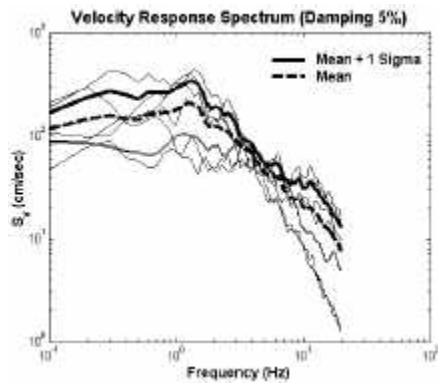
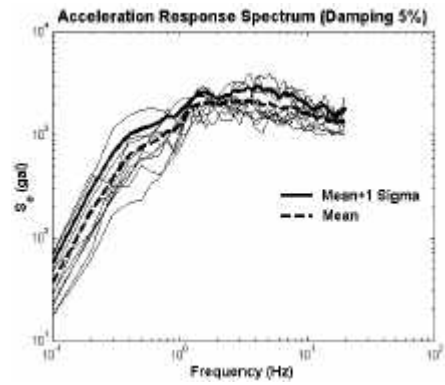
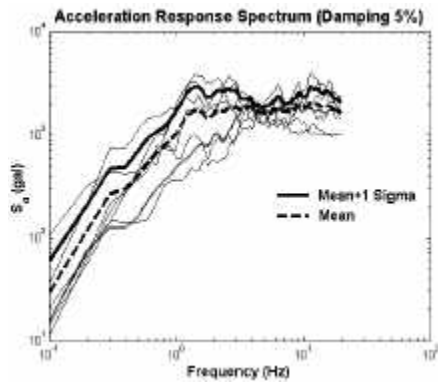
표 2에 본 연구에서 선정한 분석대상 지진의 종류 및 특성을 기술하였다. 표에서 보는 바와 같이 암반지반에서 측정된 4개의 지진과 토양지반에서 측정된 5개의 지진기록으로 총 18개 성분의 지진파를 사용하였다.

지반조건에 따른 응답스펙트럼의 변동 양상을 분석하기 위해서 암반지반과 토양지반에 대한 각각의 응답스펙트럼값을 통계처리하여 평균과 표준편차를 구하고 비초과확률(Nonexceedance Probability)이 84%인 평균+1 σ 값을 갖는 스펙트럼을 작성하였다.

그림 4는 선정된 지진에 대한 가속도, 속도, 그리고 변위 응답스펙트럼을 지반조건에 따라 함께 도시한 것이다. 그림에서 굵은선은 비초과확률이 84%인 평균+1 σ 값을 나타내며, 점선은 평균값을 나타낸 것이다.

표 2. 근거리 지진 데이터[9]

Site	Earthquake	Station Name	Magnitude (Mw)	표기	Max. Acc. (g)	Max. Vel. (cm/sec)	Max. Disp. (cm)
Rock Site	Landers, 1992	Lucerne	7.2	Luce 270	0.7302	148.64	271.12
				Luce 360	0.8050	32.79	71.78
	Cape Mendocino, 1992	Cape Mendocino	7.0	Cape 00	1.4960	131.00	59.88
				Cape 90	1.0380	43.90	34.43
	Kobe, 1995	JMA	6.9	Kobe EW	0.6287	75.67	1536.87
				Kobe NS	0.8332	92.09	234.72
Loma Prieta, 1989	Los Gatos Presentation Center	6.9	Lgpc 00	0.5700	96.31	36.93	
			Lgpc 90	0.6075	52.14	16.86	
Soil Site	Tabas, 1978	Tabas	7.4	Taba 74	0.8790	98.26	35.73
				Taba 344	0.9363	114.23	87.78
	Cape Mendocino, 1992	Petrolia	7.0	Petr 00	0.5890	46.39	26.66
				Petr 90	0.6616	90.86	26.74
	Northridge, 1994	Rinaldi Receiving Station	6.7	Rina 228	0.8410	174.81	49.16
				Rina 318	0.4798	80.63	48.47
	Northridge, 1994	Sylmar Converter Station	6.7	Sylm 90	0.6037	77.43	20.25
				Sylm 360	0.8423	128.88	30.67
	Imperial Valley, 1979	Meloland	6.5	Melo 00	0.3170	70.21	122.90
				Melo 270	0.2966	94.63	313.30

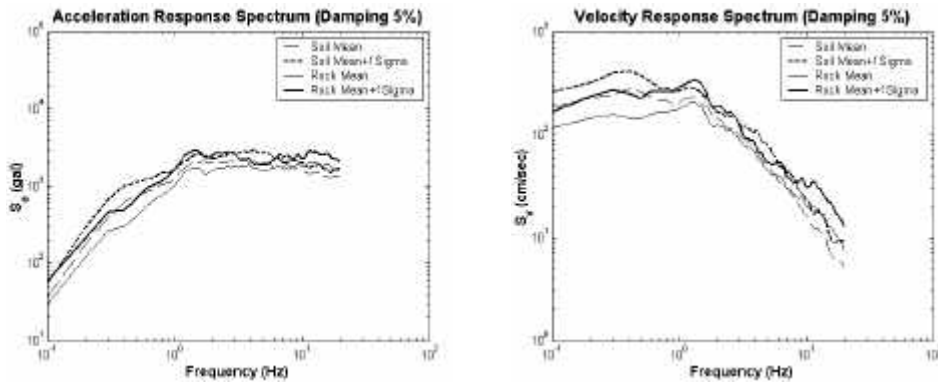


(a) 암반지반

(b) 토양지반

그림 4. 암반지반 및 토양지반 근거리 지진에 대한 응답스펙트럼 비교

그림 5에는 암반지반 및 토양지반에 대한 응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 가속도 및 속도 응답스펙트럼의 경우 10Hz 이상의 고진동수 영역에서는 암반지반의 값이 크게 나타났으나 저진동수 영역에서는 토양지반에서의 응답이 크게 나타났다. 특히 저진동수 영역에서의 속도 응답스펙트럼에서 토양지반에서의 응답이 현저히 크게 나타났다. 이는 근거리 지진에 대한 지반의 영향을 잘 나타내주는 것으로 토양지반에 건설된 저진동수 특성을 갖는 구조물이 근거리 지진에 매우 취약할 수 있음을 보여주는 것이다.



(a) 가속도응답 스펙트럼

(b) 속도응답 스펙트럼

그림 5. 지반특성에 따른 근거리 지진의 스펙트럼 비교

4. 결론

본 연구에서는 근거리 지진 데이터를 이용하여 근거리 지진의 지진파 특성을 분석하고 이를 원전 구조물의 설계에 사용되어온 설계 스펙트럼과 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 근거리 지진에서는 단층활동의 방향성, Fling 영향 등으로 인해 초기에 큰 속도를 갖는 펄스형태의 운동을 보여주고 있으며 이로 인해 원거리지진에 비해 속도 및 변위성분이 매우 크게 나타난다.
- 근거리 지진은 원거리 지진에 비해 가속도, 속도 및 변위 응답스펙트럼에서 전체적으로 큰 값을 나타내고 있으며 특히 저진동수 구간에서 큰 차이를 보여주고 있다. 따라서 저진동수 구조물이 근거리 지진을 받을 경우 그 피해가 크게 발생할 수 있다.
- 근거리 지진에 의한 응답스펙트럼을 표준 응답스펙트럼과 비교한 결과 1Hz 이하의 저진동수 영역에서 근거리 지진에 의한 값이 크게 나타났으며 특히 속도 응답스펙트럼 값에서 현저한 차이를 보여주고 있다.

- 암반에서 측정된 근거리 지진의 경우 고진동수 영역에서 스펙트럴 가속도가 크게 나타나 고진동수에 민감한 원전 기기의 내진성능 평가 시 이에 대한 고려가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

이상의 연구는 한정된 지진자료를 이용하여 근거리 지진파에 대한 지진파분석만을 수행한 것으로 근거리 지진이 원전 구조물 및 기기의 내진안전성에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 큰 PGV를 갖는 근거리 지진에 의한 구조물 및 기기의 응답에 미치는 영향 등에 대한 더욱 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Babak Alavi and Helmut Krawinkler, "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. N. Abrahamson, <http://civil.eng.buffalo.edu/webcast/abrahamson/presentation.html>.
4. 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.
5. Abrahamson, N. A. and P. G. Somerville, "Effects of the Hanging Wall and Foot Wall on Ground Motions Recorded during the Northridge Earthquake," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1996.
6. Abrahamson, N. A. and W. J. Silva, "Empirical response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes," *Seismological Research Letters*, 68, 1997.
7. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
8. W. Liao, C.-H. Loh, and S. Wan, "Earthquake Responses of RC Moment Frames Subjected to Near-Fault Ground Motions," *The Structural Design of Tall Building*, Vol. 10, 2001.
9. N. Abrahamson and P. Somerville, "Selected Motions for Comparative Studies between PEER Researchs," *1st PEER Workshop on Characterization of Special Source Effects*, 1998.