

비탄성 응답스펙트럼 분석을 통한 근거리 지진의 평가

Evaluation of Near-Fault Ground Motions by Inelastic Response Spectrum Analysis

김형규¹⁾ 최인길²⁾ 진영선³⁾
Kim, Hyung-Kyu Choi, In-Kil Choun, Young-Sun

ABSTRACT

Near-field ground motions exhibit special characteristics that are different from ordinary far-field ground motions. This paper first briefly examines the characteristics of near-field ground motions associated with fault directivity and fling-step effects. Then evaluation of near-field ground motions by inelastic response spectrum analysis is performed and analyzed. As a result, ductility demand in near-field ground motions is larger in hanging wall than in foot wall in long period regions. Also in long period regions ductility demand in soil site is larger than that in rock site.

1. 서론

최근 발생한 Northridge 지진(1994년, 미국), Kobe 지진(1995년, 일본), Chi-Chi 지진(1999년, 대만), 그리고 Kocaeli 및 Duzce 지진(1999년, 터키) 등에 의해 많은 인적, 경제적 피해가 발생했다. 이들 지진에 의해 피해를 입은 대부분 지역은 지진을 발생시킨 활성단층(Active Fault) 인근에 있었고 과거의 내진설계기준에 따라 설계된 구조물의 피해도 매우 큰 것으로 보고되고 있다[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

1) 한국원자력연구소 학연과정
2) 한국원자력연구소 선임연구원
3) 한국원자력연구소 책임기술원

크다고 할 수 있다.

근거리 지진에 대한 연구는 세계적으로도 아직 초기 단계에 있으며 안전성이 최우선인 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 내진 안전성에 대한 관심이 크게 증폭되고 있다. 이들 단층이 활성단층으로 판명될 경우 이들 단층에서 발생하는 근거리 지진에 의한 원전 구조물 및 기기의 내진 안전성에 대한 재평가가 필수적으로 수행되어야 하겠다. 따라서 본 연구에서는 과거에 발생한 근거리 지진 기록 중 데이터의 확보가 가능한 대표적인 근거리 지진 실측자료를 이용하여 완전 탄-소성 구조물에 대한 비탄성 응답스펙트럼을 분석함으로써 추후 근거리 지진에 대비한 구조물 및 기기의 내진 안전성 평가에 기초자료로써 활용하고자 한다.

2. 근거리 지진의 일반적 특성

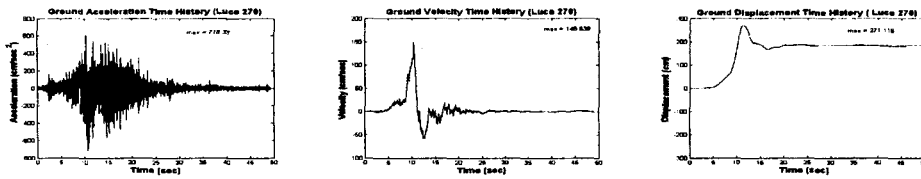
근거리 지진은 지진파의 초기에 나타나는 펄스형태의 매우 큰 속도와 큰 장주기 성분으로 대변할 수 있다[3]. 이러한 펄스형태의 운동은 큰 에너지를 가지고 있어 구조물에 큰 피해를 발생시킬 수 있으며 특히 펄스의 주기와 근접한 고유주기를 갖는 구조물의 경우 구조물의 응답이 급격히 증가하게 된다. 지진원(Seismic Source)의 특징과 관련하여 근거리 지진은 원거리 지진과는 달리 지진원을 하나의 점(Point)으로 모델링하여 해석할 수 없기 때문에 지진원의 특징을 고려해야 한다.

근거리 지진에서 큰 속도성분을 갖는 주된 원인은 단층운동의 방향성(Rupture Directivity)과 Fling-Step의 영향으로 대별할 수 있다. 그 외에 역단층이나 정단층과 같은 Dip-Slip Fault에서 발생할 수 있는 상반(Hanging Wall)의 영향을 들 수 있다[4].

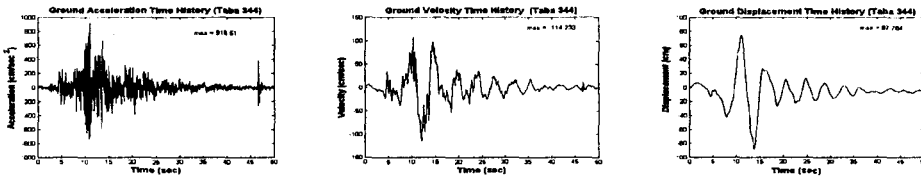
방향성과 관련하여 전방향성(Forward Directivity) 활동의 진행은 부지의 전단파 속도에 근접한 속도로 발생하기 때문에 지진 초기에 매우 짧은 지속시간을 갖는 펄스운동을 발생시킨다. 후방향성(Backward Directivity)을 나타내는 지진기록은 긴 주기의 작은 진폭을 가지고 긴 지속시간 동안 운동한다[4]. 방향성에 따른 근거리 지진의 시간이력을 그림 1에서 제시하였다. 그림 1에서 지진 발생 초기에 큰 속도성분을 갖는 펄스 형태의 지진파를 볼 수 있으며 변위 성분이 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 Landers 지진에서는 지반의 영구변형이 크게 나타나는 Fling의 영향을 확인할 수 있다.

상반의 영향과 관련하여 정단층이나 역단층에 의한 지진파의 단주기 성분이 Strike-Slip Fault에 비해 1.3~1.4배 정도 증가하게 된다[5]. Abrahamson과 Somerville[6]은 상반과 하반(Foot Wall)에서 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[7].

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



(a) Landers Earthquake(Rock Site)



(b) Tabas Earthquake(Soil Site)

그림 1. Landers 지진 및 Tabas 지진의 시간이력

3. 근거리 지진의 특성 분석

근거리 지진의 특성을 분석하기 위해서 상반 및 하반 그리고 지반조건에 따라 지진파의 비탄성 응답 스펙트럼을 작성하여 연성도(Ductility)를 산정한 후 특성에 따라 각각의 값을 평균하여 특성을 비교·분석하였다.

3.1 비탄성 응답스펙트럼 작성

감쇠비 ξ 와 고유주기 T_n 은 선형 탄성 구조물의 지진응답에 영향을 미치는 구조적 성질이지만 지진하중 하에서 탄성한계 이상으로 변형하는 구조물의 성능은 구조물의 강도와 연성도에 의해서도 크게 좌우된다. 본 논문에서는 단자유도계 구조물에 대한 비탄성 응답스펙트럼을 구하는 프로그램인 NONSPEC[8]을 이용하여 완전 탄-소성 모델을 갖는 구조물에 대한 연성도 스펙트럼을 작성하였다. 정규화된 운동방정식은 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\ddot{\delta} + 2\xi\omega\dot{\delta} + \omega^2\rho = -\frac{\omega^2}{\eta} \cdot \frac{\ddot{u}_g(t)}{\ddot{u}_{g,\max}}$$

여기서 $\delta = u / u_y$: 항복변위로 정규화된 변위

$\rho = R / R_y$: 항복력에 의해 정규화된 저항력

$\omega = \sqrt{M/K}$: 각 진동수(M은 구조물 질량, K는 구조물 강성)

$\eta = R_y / M \ddot{u}_{g,\max}$: Seismic Resistance Factor($\ddot{u}_{g,\max}$ 은 최대 지반가속도(PGA))

$C_y = R_y / Mg$: Resistance Coefficient(g는 중력가속도)

η 는 주어진 지반 가속도 하에서 구조물의 강체 운동에 의해 야기된 최대판성력에 대한 구조물

의 저항력을 나타내며 C_y 는 자체중량에 의해서 정규화된 구조물의 저항력이다.

요구연성도(Ductility Demand)은 u_{max} / u_y 이기 때문에 상기의 운동방정식에서 η 와 ξ 가 주어지면 다양한 ω 에 대한 μ 를 구할 수 있으며 이것을 그래프로 표현하여 연성도 응답스펙트럼 또는 균일 강도 응답스펙트럼을 구할 수 있다.

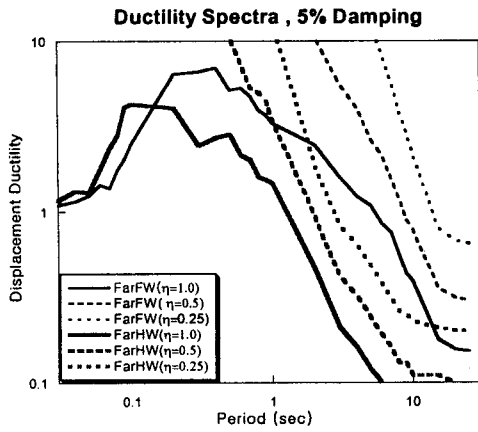
3.2 근거리 지진의 특성 평가

근거리 지진과 원거리 지진과의 특성을 비교하기 위하여 1999년 Chi-Chi 지진에서 계측된 데이터를 1g로 정규화하여 지진과의 특성을 분석하였다. 표 1에 본 연구에서 선정된 Chi-Chi 지진 기록을 측정점의 위치 및 특성을 각 방향 성분별 PGA와 함께 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 근거리 지진과 원거리 지진에 대한 지진파를 선정하고 각각에 대해 상반 및 하반에 위치한 부지에서 측정된 데이터를 분리하여 평가하였다. 근거리 지진 및 원거리 지진으로서 각각 8개의 측정자료를 이용하였으며 각각의 남북방향 및 동서방향 성분에 대한 비탄성 응답스펙트럼 분석을 수행하였다. 그림 2는 동일한 강도(η)별로 근거리 지진 및 원거리 지진 각각에 대해 상반 및 하반에서 측정된 데이터를 구분하여 작성한 비탄성 응답스펙트럼을 보여준다. 그림 2c)를 보면 $\eta=1$ 즉 $R_y = M \ddot{u}_{g,max}$ 인 경우 원거리 지진에서는 하반의 μ 가 장주기 영역에서 상반보다 전반적으로 크다. 반면 근거리 지진에서는 상반효과 때문에 장주기 영역에서 상반의 μ 가 하반보다 크다. 그림 2a)에서는 η 값 또는 항복강도가 작아지면서 원거리 지진의 μ 는 전 영역에 걸쳐 하반이 상반보다 크다. 그러나 근거리 지진에서는 단주기 영역은 하반이 장주기 영역은 상반이 μ 가 크다. 그림 2를 통하여 η 값이 작아지면 구조물은 비탄성 거동이 증가하고 큰 μ 값을 필요로 하며 μ 는 η 값과 주기가 증가하면서 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한 Log-Log 스케일 상에서 η 값과 주기의 관계는 η 값이 작아지면서 선형성을 나타낸다.

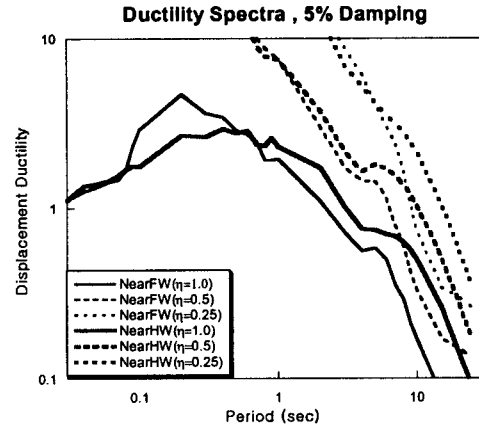
그러나 이와 같은 경향은 한정된 지진자료를 이용한 것으로 근거리 지진 및 원거리 지진의 특성을 대표한다고 할 수는 없으며 많은 지진자료를 이용한 추가적인 연구가 필요하다 하겠다.

표 1. Chi-Chi 지진기록의 종류 및 특성

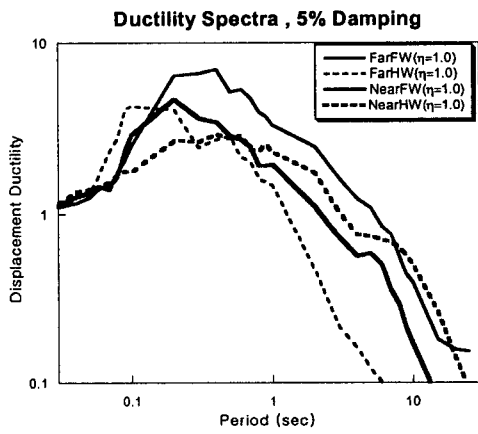
Site	Location	Station No.	Epicentral Distance (km)	Distance from Rupture	PGA (gal)			PGV (cm/sec)		
					UD	NS	EW	UD	NS	EW
Near-Fault	Hanging Wall	TCU052	38.38	1.84	193.98	436.68	348.66	168.70	220.70	183.20
		TCU068	46.74	3.01	519.42	361.94	501.60	228.60	292.20	280.50
	Foot Wall	TCU065	25.57	2.49	257.80	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	-	-	-



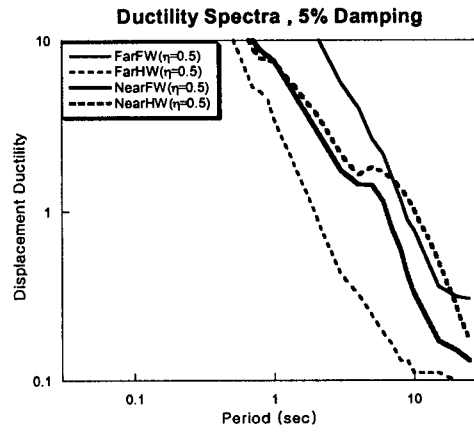
a) 원거리 지진에 대한 연성도 스펙트럼



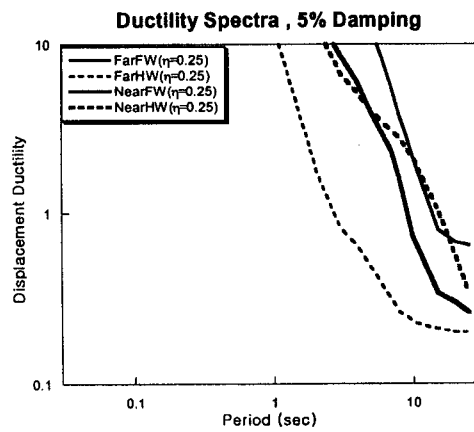
b) 근거리 지진에 대한 연성도 스펙트럼



c) $\eta=1$ 인 연성도 스펙트럼



d) $\eta=0.5$ 인 연성도 스펙트럼



e) $\eta=0.25$ 인 연성도 스펙트럼

그림 2. 근거리 및 원거리 지진의 상반, 하반의 연성도 응답스펙트럼 비교

3.2 지반특성에 따른 근거리 지진의 특성

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 근거리 지진기록을 이용하였다. 이들 지진은 한정된 데이터베이스에서 선정된 것으로 근거리 지진을 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. 표 2에서 보는 바와 같이 암반지반에서 측정된 4개의 지진과 토양지반에서 측정된 5개의 지진기록으로 총 18개 성분의 지진파를 사용하였다. 지반조건에 따른 비탄성 응답스펙트럼은 그림 3에 표시하였고 그림에서 보는 것과 같이 장주기에서는 지반조건과는 관계없이 μ 가 같아지고 $\eta=1$ 인 경우 약 0.2초 이하의 주기에서는 암반지반의 μ 가 토양지반보다 큰 반면 0.2초 ~ 10초 범위에서는 토양지반의 μ 가 암반지반보다 크다. 또한 η 가 작아지면서 토양지반의 μ 가 전 주기영역에 걸쳐 암반지반보다 크다. 이는 토양지반에 세워진 항복강도가 작은 구조물은 요구되는 연성도를 충족시키지 못하면 근거리 지진에 의한 피해가 클 수 있다는 것을 나타낸다.

표 2. 근거리 지진 데이터[10]

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

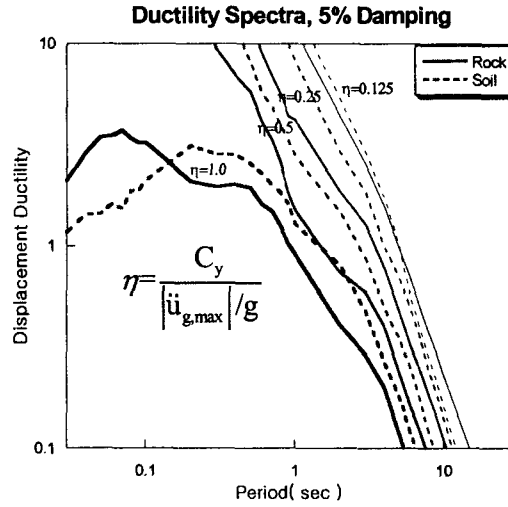


그림 3. 지반특성에 따른 근거리 지진의 연성도 스펙트럼 비교

4. 결론

본 연구에서는 근거리 지진 데이터를 이용하여 근거리 지진의 지진파 특성을 연성도 응답스펙트럼을 통하여 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 단층에서 3km 이내에서 측정된 PGA 및 PGV를 보면 단층활동의 방향성 및 상반의 영향이 매우 크게 나타난다.
- 비탄성 응답스펙트럼에 의한 요구연성도 μ 를 산정한 결과 근거리 지진은 원거리 지진과는 달리 장주기 영역에서 상반의 요구연성도가 하반보다 크게 나타난다.
- 근거리 지진은 강도 η 값과는 관계없이 단주기 영역은 하반에서 장주기 영역은 상반에서 요구연성도가 크게 나타난다.
- 강도 η 값이 작아지면서 구조물은 더 큰 요구연성도를 필요로 한다.
- 전체적인 경향으로 볼 때 근거리 및 원거리 지진의 비탄성 응답스펙트럼 비교를 통하여 근거리 지진의 영향이 명확히 나타나지 않았다. 이는 본 연구에서 채택한 근거리 지진이 일반적인 근거리 지진에 비해 진앙 및 단층에서의 거리가 멀지 않아 근거리 지진의 영향이 포함되어 있기 때문인 것으로 사료된다.
- 토양지반에서 요구연성도는 장주기 영역에서 암반지반보다 크다.

이상의 연구는 한정된 지진자료를 이용하여 근거리 지진에 대한 단자유도계 구조물의 비탄성 응답스펙트럼 분석만을 수행한 것으로 근거리 지진이 원전 구조물 및 기기의 내진 안전성에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 큰 최대지반속도(PGV)를 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. Rao, P. B. and Jangid, R. S., "Performance of Sliding Systems under Near-Fault Motions," *Nuclear Engineering and Design*, 203, 2001.
3. Abrahamson, N., <http://civil.eng.buffalo.edu/webcast/abrahamson/presentation.html>.
4. 김형규, 최인길, 전영선, 서정문, "근거리 지진의 지진파 특성 분석", 한국원자력학회 2002년도 추계학술발표회논문집, 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, 2000, pp. 21-29.
6. Abrahamson, N. A. and Somerville, P. G., "Effects of the Hanging Wall and Foot Wall on Ground Motions Recorded during the Northridge Earthquake," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1996.
7. Abrahamson, N. A. and Silva, W. J., "Empirical response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes," *Seismological Research Letters*, 68, 1997.
8. Mahin, S.A. and Lin, J., "Construction of Inelastic Response Spectra for Single-Degree-of-Freedom Systems", Report No. UCB/EERC-83/17.
9. Abrahamson, N. and Somerville, P., "Selected Motions for Comparative Studies between PEER Researchs," *1st PEER Workshop on Characterization of Special Source Effects*, 1998.