

한반도 남동부 미소지진을 이용한 응답스펙트럼 분석

Analysis of Response Spectra using Microearthquakes of Southeastern Korean Peninsula

김 연 중* 전 정 윤* 이 종 립** 장 천 중**
Kim, Yun-Joong Jeon, Jeong-Yoon Lee, Jong-Rim Jang, Cheon-Joong

ABSTRACTS

Microearthquake records with magnitude 2.6~3.1 recorded in the southeastern part of the Korean peninsula during 1994~1998 are analyzed. Total of 42 records consisted of 12 events instrumented at 7 stations. The response spectra with the above data shows that the frequency range of the dominant response is about 10~25Hz and are compared with the standard response spectrum. The result implies that the characteristics of the microearthquake ground motion differ from those of standard response spectrum presented in US NRC Reg. Guide 1.60 especially at higher frequencies.

1. 서 론

국내 원자력발전소의 내진설계시 우리나라 고유의 표준응답 스펙트럼이나 부지고유 응답스펙트럼이 없기 때문에 US NRC의 표준응답 스펙트럼(Reg. Guide 1.60)을 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake ; SSE) 값에 비례조정하여 사용하고 있다[1]. 그러나 US NRC에서 제시하고 있는 표준응답스펙트럼은 주로 미국 서부지역에서 발생한 강진기록을 이용하여 작성된 스펙트럼이다. 최근 미국의 축적된 연구에 의하여 미국 서부와 중동부의 지질 특성과 지진원 및 지진파 전달 특성이 매우 상이함이 밝혀졌으며 이에 따라 미국 중동부에 대한 표준응답 스펙트럼의 적용성에 대해 많은 연구가 수행되어 왔다. 축적된 연구결과를 배경으로 US NRC는 새롭게 개정된 규정에서 부지고유 설계 응답스펙트럼을 작성하여 적용하는 방법을 제시하고 있다.

우리나라의 경우도 원자력발전소의 내진설계시 우리나라의 지진 및 지질환경 특성이 고려된 부지고유 응답스펙트럼의 개발이 요구되고 있으나 강진기록이 전무하고 공학적으로 활용 가능한 미소지진의 관측도 최근에야 이루어지고 있어 표준응답스펙트럼의 개발에 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 1994년 12월부터 1998년 11월까지 한반도 남동부 경상분지에서 관측된 자연연구소의 미소지진 기록 중 신뢰도가 높은 미소지진 기록을 선정하고 그 자료를 이용하여 응답스펙트럼을 작성 및 분석하였다.

* 한국전력기술(주) · 정회원

**전력연구원 · 정회원

2. 본 론

한국자원연구소는 1980년대 초부터 양산단층 일대에서 매년 1~2개월씩 아날로그 방식으로 지진관측을 수행하였고, 1991년과 1992년에는 POSEIDON Project와 연계하여 한일 공동으로 디지털 지진계에 의한 임시 지진관측을 실시하였다. 관측결과 양산단층을 따라서 진앙이 집중되는 현상은 나타나지 않고, 양산단층 중앙부 동측에 진앙이 집중되며 이는 북북동 방향으로 연장되는 것으로 해석하였다. 이런 지진발생 현상을 근거로 양산단층 주변에 1년 내내 가동하는 3-성분 단주기 디지털 지진관측망을 구성하여 1994년 10월부터 지진자료를 획득하고 있다. 관측망의 기록방법은 지진계에 입력되는 진동이 일정 크기 이상인 경우에 기록하기 시작하는 Trigger 방식으로 이렇게 기록된 지진기록은 기록계에 저장되었다가 연구소로 전화선을 통해 전송된다[2, 3].

본 연구에서는 1994년 12월부터 1998년 11월까지 경상분지에서 관측된 자원연구소의 미소지진 자료를 이용하였으며 이 기간에 계측된 지진의 진앙과 관측소의 위치가 그림 1에 도시되어 있다.

2.1 지진자료의 특성

한국자원연구소에서 계측한 지진기록은 속도성분으로 작성되어 있다. 따라서 각각의 속도 기록을 미분하여 가속도 시간이력을 작성해야 한다. 이렇게 작성된 가속도 시간이력을 이용하여 지반 가속도 응답스펙트럼을 작성하였다.

관측된 미소지진 기록의 sampling rate가 0.01초 내지는 0.02초로 고정되어 있는데 Nyquist frequency가 각각 50Hz와 25Hz이다. 일반적으로 응답스펙트럼 특성 분석시 관심 진동수 대역이 약 30Hz 이하이므로 일부 기록은 고진동수 대역을 대표하지 못한다는 단점이 있고 anti-aliasing 필터링의 영향이 어떠한지에 대해서도 확인이 안 되어 있는 상태이다[4]. 또한 최대가속도가 0.1g를 초과하는 기록은 saturate되어 약 4 이상의 규모를 가지는 지진자료의 사용에 어려움이 있다.

2.2 미소지진자료의 선정

획득된 자원연구소의 지진자료중 신뢰성이 높은 지진기록을 선정하기 위해 다음과 같은 기준을 설정하였다. 1) 근거리의 진앙거리 : S-P time이 5초 이내인 지진기록(진앙거리가 약 40km 이내)을 선정하였는데 이는 지역별로 큰 차이가 발생할 수 있는 지진과 전달경로와 감쇄에 따른 효과를 최소화하기 위함이다. 2) 규모 범위 : 규모 2.6~3.1의 지진기록을 선정하였는데 규모 3.0 이상의 지진기록이 매우 적고 규모가 이보다 커질 경우 saturate되어 있기 때문이다.

위와 같은 기준을 적용하였을 때 12개의 event에 의한 21개 기록이 선정되며 각각 2개의 수평 성분 기록이 존재하기 때문에 최종적으로 42개의 수평성분 지진기록을 얻을 수 있었다. 12개 event의 진앙위치가 그림 2에 도시되어 있고 21개 기록의 미소지진 목록이 표 1에 정리되어 있다. 선정된 지진들의 평균 진앙거리는 27.3km이고 규모의 평균은 약 2.8 정도이다.

가속도 시간이력의 대체적인 형태는 일정한 작은 진폭을 보이는 파형이 지속되다가 P파의 입사로 시작하여 그 진폭이 급격히 커지는 구간이 생기고 그 이후로 진폭이 감소하여 다시 처음의 작은 진폭으로 감소하게 된다. 실제 지진에 의한 파형은 처음 진폭이 커지는 시점으로부터 진폭이 다시 원래대로 작아지는 시간까지의 구간(window)으로 응답스펙트럼의 계산효율 향상 및 지진 전후의 필요 없는 기록의 제거를 위하여 그 구간에 해당하는 시간이력만을 추출하였다.

2.3 응답스펙트럼 분석

지진마다 그 규모와 최대 가속도의 크기가 다르기 때문에 각각의 응답스펙트럼을 작성하면 그 준위가 일정하지 않게 된다. 지진의 최대 가속도의 절대값을 1g로 통일하기 위하여 전체 시간이력을 최대 가속도의 절대값으로 나누어 정규화(normalization)하였다.

위에서 정규화된 지진기록을 이용하여 감쇠비 0.5%에 대한 응답스펙트럼을 계산하였다. 42개 스펙트럼 계산 결과(그림 3)를 통계처리하여 로그-노말 스케일에서의 중앙값, 평균값, 84 percentile(평균+1 σ) 값을 계산하여 그림 4에 도시하였다.

경상분지에서 기록된 규모 2.6에서 3.1 범위의 지진을 이용한 이 시험분석은 최대 응답스펙트럼의 진동수 대역이 약 10~25Hz 범위에 걸쳐있음을 보여준다. 현재 국내에서 준용하고 있는 US NRC의 표준응답스펙트럼과 비교하여 볼 때, 최대응답의 진동수 대역폭이 훨씬 고진동수 쪽에 분포하고 있다. 미소지진의 특성상 저진동수 성분의 특성을 파악하기는 어렵지만 고진동수에서의 높은 응답특성이 주목할 만하며 이는 현재 미중동부에서의 연구결과와 유사한 결과를 보이고 있다. 이 결과는 다른 안정대륙 지역의 미소지진들에 의한 응답스펙트럼과의 비교를 목적으로 이용될 수 있다[5].

2.4 민감도 분석

우선 규모 3.0 이상의 지진기록에 의한 응답스펙트럼과 규모 3.0 미만의 지진기록에 의한 응답스펙트럼을 구분하여 그 변화를 비교하였다(그림 5, 6). 지진자료의 수가 전자의 경우 12개이고 후자의 경우 30개로 중앙값, 평균값, 84 percentile값의 폭이 규모 3.0 미만의 자료로 작성된 응답스펙트럼에서 더 크게 나타났고 이는 자료의 수가 더 많기 때문으로 추정된다. 전자의 경우 최대응답의 진동수 대역이 8~20Hz 사이에 나타나며 10~25Hz 사이에 최대응답의 진동수 대역을 보이는 후자에 비해 저진동수 성분이 다소 많이 나타남을 보인다. 그 규모의 차이가 그다지 크지는 않아 뚜렷한 경향을 인지하기는 어렵지만 규모가 증가함에 따라 큰 응답을 나타내는 진동수 범위가 넓어지며 저진동수 영역에서 그 응답이 커지는 경향을 보이며 이는 Boore[6]가 제시한 규모별 가속도 응답스펙트럼의 형태와 동일한 특성을 나타내는 것이다[7].

기록계의 특성상 sampling rate가 0.02초인 기록과 0.01초인 기록을 구분하여 응답스펙트럼을 각각 작성해 보았다. sampling rate가 0.02초일 경우 이론적으로 관측가능한 진동수 대역은 25Hz까지로 그 이상의 응답은 신뢰도가 떨어지게 된다. 이러한 자료는 18개로 그림 7에서 보면 최대응답이 10Hz 전후에 나타나며 20Hz 이상에서는 급격하게 낮아지는 현상을 보인다. sampling rate가 0.01초일 경우 50Hz까지 관측가능하며 그림 8에서 보면 최대응답이 20~30Hz에서 나타난다. 이는 기록계의 정밀도가 미치는 영향이 매우 크다는 것을 지시하며 이러한 문제점은 현재 구축되어 있거나 구축되고 있는 신형 관측계와 기록계에 의한 양질의 지진기록이 축적되면 해결될 수 있을 것이다.

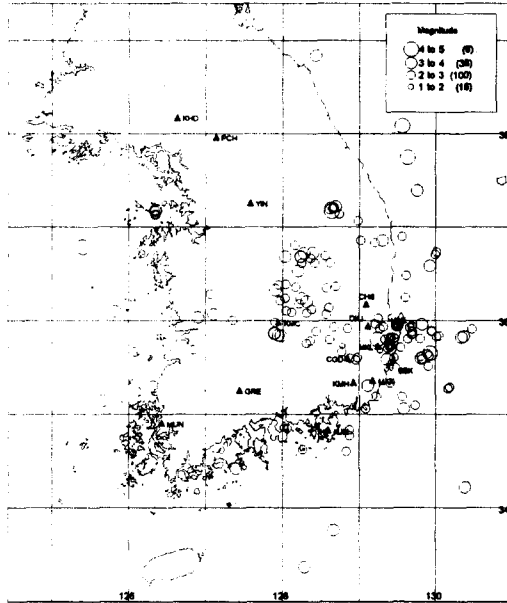


그림 1. 자원연구소 지진관측소 및 미소지진의 분포

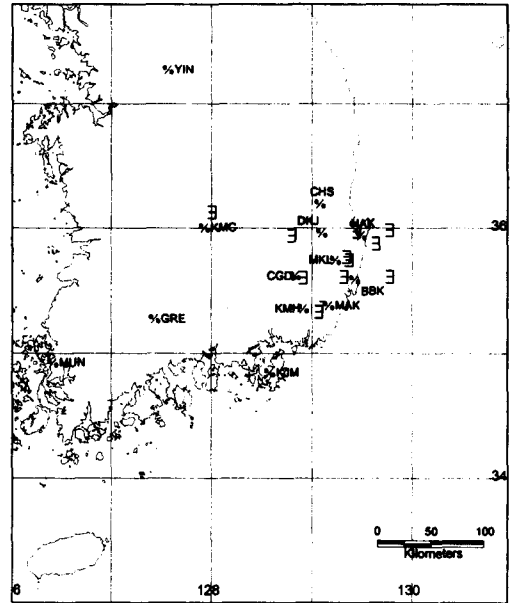


그림 2. 분석대상 지진의 진앙위치

표 1. 분석에 이용된 미소지진 목록

No.	Record Name	Date	Time	Lat.	Long.	D _{epi}	Depth	Mag.	P-S Time	Sampling Rate	Bedrock
1	MKL2144	960202	03:35:02.32	35-43.43	129-24.81	15.4	13.10	2.7	2.40	0.02	granite
2	BBK2498	960202	03:35:02.32	35-43.43	129-24.81	16.5	13.10	2.7	2.56	0.02	tuff
3	HAK2427	960202	03:35:02.32	35-43.43	129-24.81	23.9	13.10	2.7	3.08	0.02	tuff
4	DKJ3083	960202	03:35:02.32	35-43.43	129-24.81	36.7	13.10	2.7	4.59	0.02	shale-siltstone
5	MKL2418	960227	04:39:33.98	35-57.00	129-29.55	33.2	10.16	3.0	4.28	0.02	granite
6	DKJ3259	960227	04:39:33.98	35-57.00	129-29.55	34.4	10.16	3.0	4.34	0.02	shale-siltstone
7	MKL2434	960228	07:07:21.93	35-56-95	129-29.39	33.0	10.33	2.8	4.24	0.02	granite
8	DKJ3265	960228	07:07:21.93	35-56-95	129-29.39	34.1	10.33	2.8	4.36	0.02	shale-siltstone
9	KMH1164	960516	11:05:43.27	35-18.50	129-06.91	17.5	15.03	3.0	2.71	0.02	granite
10	BBK4215	960929	05:58:40.15	35-35.35	129-49.18	34.7	16.76	2.7	4.07	0.01	tuff
11	DKJ4384	961125	00:27:50.36	35-44.88	129-23.29	33.1	1.59	2.8	4.12	0.01	shale-siltstone
12	MKL3988	970917	09:33:18.46	35-35.44	129-21.76	18.8	10.69	3.1	2.86	0.01	granite
13	MAK3448	970917	09:33:18.46	35-35.44	129-21.76	29.9	10.69	3.1	3.85	0.01	granite
14	DKJ4619	971011	19:50:28.76	35-55.05	128-50.69	24.2	10.93	2.7	3.44	0.01	shale-siltstone
15	CGD0355	971011	19:50:28.76	35-55.05	128-50.69	34.8	10.93	2.7	4.53	0.01	
16	HAK3662	980415	07:28:28.82	35-51.18	129-40.89	18.1	15.53	2.8	3.00	0.01	tuff
17	HAK3753	980707	17:37:12.99	35-57.65	129-49.20	28.9	16.30	3.0	4.74	0.01	tuff
18	CGD0468	980804	21:43:21.26	35-34.83	128-57.31	10.3	13.89	2.8	2.17	0.01	
19	KMH2959	980804	21:43:21.26	35-34.83	128-57.31	26.6	13.89	2.8	3.65	0.01	granite
20	MAK3601	980804	21:43:21.26	35-34.83	128-57.31	31.2	13.89	2.8	4.19	0.01	granite
21	KPO0956	970513	07:38:09.38	36-06.30	128-03.00	37.5	9.05	2.6	4.65	0.01	

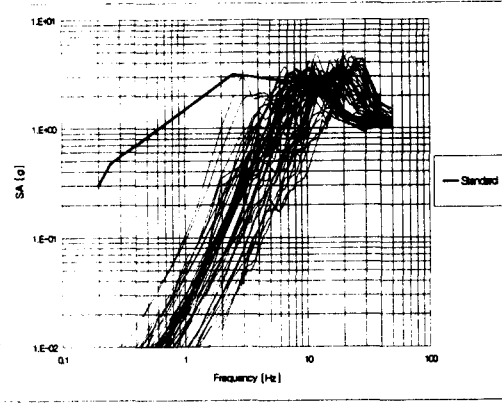


그림 3. 42개 미소지진기록에 의한 응답스펙트럼

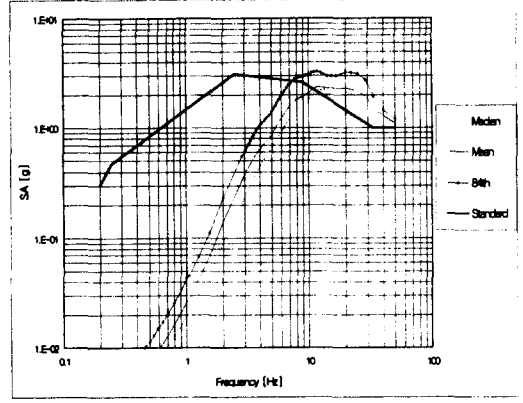


그림 4. 지반가속도 응답스펙트럼 통계처리 결과

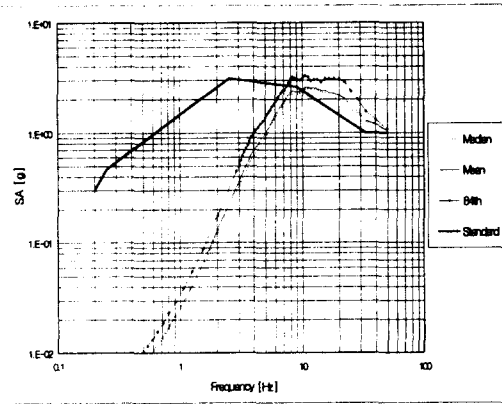


그림 5. 규모 3 미만의 지진기록에 의한 응답스펙트럼

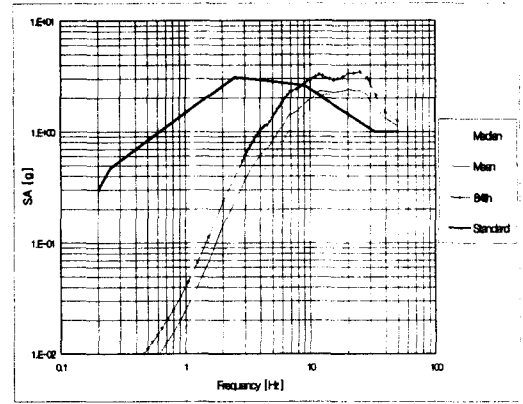


그림 6. 규모 3 이상의 지진기록에 의한 응답스펙트럼

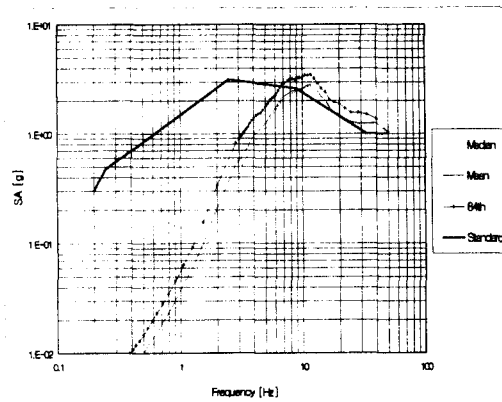


그림 7. Sampling Rate가 0.02초인 기록에 의한 응답스펙트럼

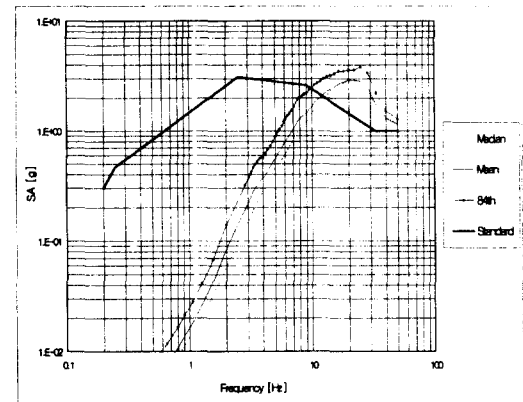


그림 8. Sampling Rate가 0.01초인 기록에 의한 응답스펙트럼

3. 결 론

한국자원연구소에서 1994년부터 1998년 사이에 한반도 남동부 지역에서 측정한 미소지진 기록 중 근거리의 일정 규모 범위를 갖는 지진의 수평성분 기록 42개를 이용하여 응답스펙트럼을 작성한 결과 US NRC의 표준응답스펙트럼보다 고진동수 대역에서의 응답이 훨씬 높은 값을 가지고 있음을 보여주고 있다. 미소지진의 특성상 저진동수 대역에 대한 응답이 매우 낮게 나타나지만 최대응답 진동수 대역이 약 10~25Hz 범위에 나타나는 특성은 기존의 표준응답스펙트럼과 뚜렷하게 대비된다. 이는 현재 미중동부 지역에서 연구되고 있는 지진의 응답특성과 유사한 경향을 보이는 것으로 보다 면밀한 검토를 위해서는 신뢰도가 높은 다수의 중규모 지진기록이 요구된다.

본 연구에서 수행된 미소지진에 대한 응답스펙트럼 분석은 향후 한반도의 부지고유 응답스펙트럼 개발 및 미소지진을 이용한 강진합성 등에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 전력연구원의 한반도 지질 및 지진특성이 고려된 부지고유 내진설계 응답스펙트럼 기술개발 사업의 일환으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. US NRC(1973), Regulatory Guide 1.60, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants", Rev. 1.
2. 한국자원연구소(1995), 경상분지에서의 지진연구(III), KR-95(C)-5.
3. 한국자원연구소(1998), 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가(제2권).
4. 김준경(1998), 영월 및 경주지진 파형의 주파수 분석(II), 한국지진공학회 1999년도 춘계학술대회 논문집
5. EPRI(1994), "The Earthquakes of Stable Continental Regions", TR-102261-V1.
6. Boore, D. M.(1983), "Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra," Bull. Seism. Soc. Am., 73(6), 1865-1894.
7. 박정옥, 최인길, 서정문(1999), 경상분지내 미소지진의 공학적 특성, 한국지진공학회 1999년도 춘계학술대회 논문집