

2000년도 한반도 지진활동의 공학적 특성

The Engineering Characteristics of Seismicity of Korean Peninsula in 2000

이전희*1) 김환승**2)

Lee, Jun Hee Kim, Hoan Seung

Abstract

Several seismic traces of earthquakes observed from the digital new type seismograph instruments of KMA in 2000 were scanned. From these, good quality data which have high signal/noise ratio were selected and they were transformed into ascii data from binary data(mini-seed format). The hypo71 program and P-S was applied in order to determine the location of epicenter, origin time and the magnitude. From these data, the 29 earthquakes, 358 seismic records consist of 587 directional components were calculated. Using theses, ground acceleration data, acceleration, velocity, and displacement response spectrums of the structures were calculated and they could be represented in a picture by the form of tripartite response spectrum. In the result, response spectrums of the 587 directional components of the above seismic data records were obtained respectively.

1. 서론

최근까지 한반도에서 지진위험도를 평가할 때, 주로 역사지진자료의 분석을 통하여 이 작업이 이루어졌으며 그 분석결과는 지진구역지도(seismic zoning map), 또는 진도와 지반가속도의 최대값에 대한 등고선지도(seismic contour map) 등으로 표현되었다^{1), 2), 3)}. 그러나 특정 지역의 지진위험도를 평가할 때 지진구역지도와 지진재해도 지도에 의존하는 것보다는 이를 예측공식(predictive equation)에 의하여 나타내는 편이 더욱 바람직하다. 우리나라의 경우 현재까지는 한반도와 유사할 것으로 추정되는 미국, 중국 등 다른 지역의 공식을 적용하여 지진재해도를 분석하여 왔으나 이는 각 지역의 진원기구 및 지반 매질 특성의 상이성 등으로 인하여 지진학적 견지에서 불확실성이 매우 크다고 할 수 있다.⁴⁾ 예측공식을 이용하여 특정 지역의 최대지반운동과 응답스펙트럼을 예측하는 방법에 대한 연구는 미국과

* 기상청 지진담당관실 기상연구소

** 기상청 지진담당관실 기상서기

일본 등지에서 많은 지진학자들에 의하여 행하여졌다. 예측공식을 개발하기 위해서는 지진의 규모와 진앙거리를 포괄할 수 있는 계기지진 자료가 축적되어야 하나 우리나라의 경우 강지진동 자료의 결여로 인하여 직접적으로 개발하기 어렵다. 따라서 계기지진자료의 분석을 통하여 한반도에서 미래에 일어날 가능성이 있는 지진에 대한 최대지반운동(peak ground motion)이나 응답스펙트럼(response spectrum)을 추정하는 연구는 더욱 중요하며 시급한 문제이다. 국내 원자력발전소의 내진설계시 우리나라 고유의 표준응답스펙트럼이나 부지고유 응답스펙트럼이 없기 때문에 US NRC의 표준응답 스펙트럼⁴⁾을 안전정지지진 값에 비례조정하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 기상청에서 2000년 동안 수집한 지진자료들을 이용하여 응답 스펙트럼을 구하고 이를 규모별로 분류하여 그 평균값을 계산하였다.

2. 기상청 계기지진 관측역사

한반도에서 계기지진관측이 시작된 것은 1905년에 일제의 조선총독부 인천관측소에서 비롯되어 1943년까지 부산, 서울, 대구, 평양, 추풍령 등 6개소까지 확대 운영하였던 것으로 알려져 있으며 1944년부터 1962년까지 사회적 혼란기로 관측의 공백기간이 있었다. 1963년 미국지질조사소에서 세계표준지진관측망(WWSSN : World-Wide Standard Seismograph Network) 운용사업의 일환으로 지진계 1대를 서울에 설치하였다.

기상청에서 본격적으로 계기지진관측을 한 기록은 1978년부터로 이때부터 유감지진뿐만 아니라 무감지진까지 기록계에 기록되어 분석이 가능한 모든 지진에 대해 진앙과 규모를 기록하고 있으며 이중 유감지진일 경우는 지진통보를 발표하고 있다. 현재 지진관측망이 설치된 지점은 원주, 진주, 전주, 흑산도, 안동, 완도, 포항, 거창, 속초, 울산, 영월, 여수, 군산, 목포, 추풍령, 수원, 강화, 제주, 백령도 등이다(그림 1). 또한 현재 미국지질조사소에서 설치하여 기상청과 협조하여 운영하고 있는 인천의 초광대역지진계의외에 광주에 1소를 설치하여 2소의 초광대역지진계를 운영하고 있다. 이들 지진관측장비들은 전국에 분포하여 지진이 발생하였을 때 지진파가 실시간으로 서울의 본청에서 운용하는 지진분석시스템으로 보내진다. 이들 지진관측센서로부터 보내진 지진파 신호는 자동분석시스템에 설치된 Antelope라는 운영 소프트웨어에 의하여 자동으로 분석되고 있다.

이와 함께 가속도관측을 위해 63소의 지진계 설치장소에 가속도계를 병행 설치하고 있으며(그림 2) 이 가속도계는 지진 발생시 지진의 진동이나 지진에 의해 건물에 미치는 영향을 가속도로 관측하게 될 것이다. 2001년도까지는 전국에 31소의 단주기 및 광대역의 속도관측망과 함께 75소의 가속도관측망을 운영할 계획이다(그림 3).

3. 분석 자료

본 연구에서는 기상청에서 2000년도에 관측한 지진자료 가운데 선정하였다. 기상청이 올해 이때까지 공식적으로 발표한 지진의 횟수는 총 29회이다(표 1). 그림 4에 본 연구에서 이

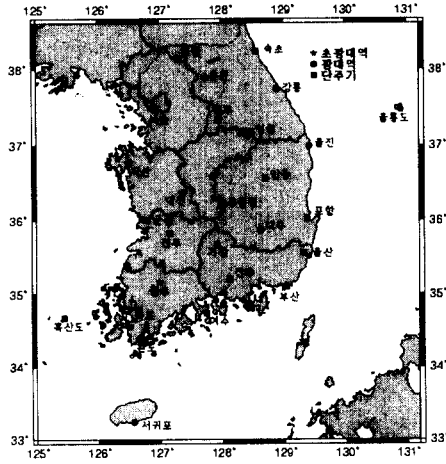


그림 1. 현재 기상청 지진관측망
(속도 지진계 분포망)

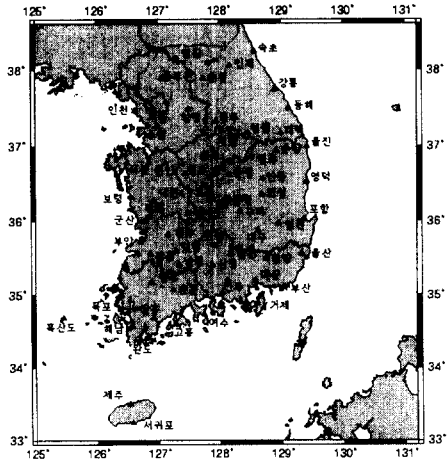


그림 2. 현재 기상청 지진관측망
(가속도계 분포망)

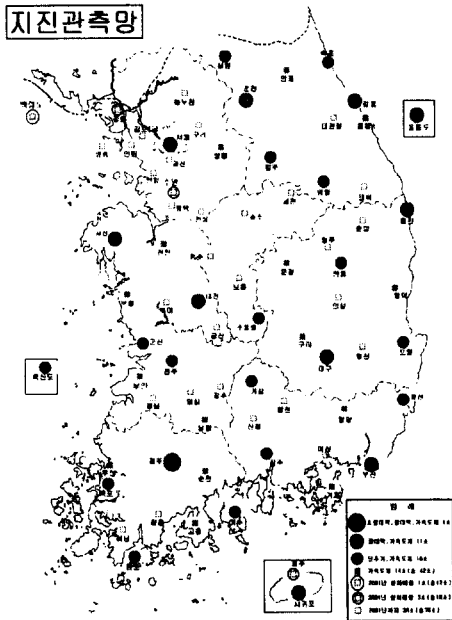


그림 3. 한국 기상청의 지진관측망 분포
(현재 및 2001년도 계획)

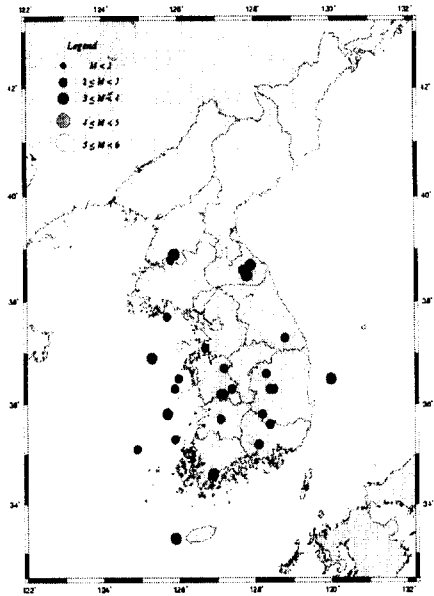


그림 4. 2000년도 한반도 발생지진의
진앙지 분포

용된 지진들의 진앙위치를 도시하였다.

분석 프로그램은 한국자원연구소에서 배포한 프로그램 Analyst 2.3을 이용하였다. 이 Analyst 2.3 프로그램은 자연재해 방재 연구 사업단과 과학 기술부 공공기술과의 후원으로 자원연구소 지진연구센터에 의해 개발 중에 있는 지진과 분석프로그램으로 국내 지진관측소에서 관측된 지진자료를 지진학 또는 지진공학 연구 종사자들이 편리하게 이용하여 국내 지진관련 연구 성과를 극대화하기 위하여 만들어진 프로그램이다. 이는 기본적으로 shareware로서 원하는 사람들은 우편으로 신청하여 CD로 받거나 인터넷 상에서 다운로드 받을 수 있다.

4. 진원 요소 분석

이상의 29개 지진으로부터 신호/잡음비가 우세한 양질의 지진자료들을 선별하여 358개의 지진기록자료를 획득한 후 이진자료(mini-seed format)로부터 아스키 자료로 전환하였다. 이들 자료를 이용, 진앙의 좌표, 진원의 깊이, 발진시각 및 규모 등의 진원요소들을 결정하기 위하여, hypo71 프로그램 수행 및 P-S 주행시간으로 진앙거리를 역산하여 진앙의 좌표, 진원의 깊이, 발진시각 및 규모 등의 진원요소들을 결정하였다. 초동 도착시간으로부터 진앙 및 발생시간은 김상조⁴⁾의 지각 속도구조 모델을 사용하여 진앙결정용 프로그램인 HYPO71PC로 결정하거나 P파와 S파의 도착시간의 차이(PS시)를 이용하여 결정하였다.

진앙이 관측망 밖에 위치할 때 P파의 도착시간만을 사용할 경우 HYPO71PC로부터 결정된 진앙은 실제 진앙의 위치에서 가장 인접한 관측소로 이동하여 놓이게 된다. 이는 모든 진앙결정 프로그램이 관측된 도달시간과 계산된 시간차의 제곱평균제곱근(root mean square)을 최소화하도록 설계되어 있으므로 당연한 결과이다. 따라서 관측망 밖에 위치한 진앙을 결정할 경우 S파의 도착시간, 즉 PS시에 의한 진앙과 관측소사이의 거리에 대한 제한이 필요하다.

지진파의 진폭은 진앙과의 거리 및 지역적 감쇄특성 등에 의해 많은 편차를 나타낸다. 규모(M)를 계산하는 식은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 지진장비에 의하여 Tsuboi 공식을 사용한다.

$$M = 1.73 \log A + \log B - 0.83$$

M: 규모로서 단위는 없고 소수 1자리까지 계산한다.

A: 진앙거리(단위: km)

B: $(\sqrt{MN^2 + ME^2} \times 1000) / \text{배율}$ (MN: 남북방향, ME: 동서방향)

즉, 지진동의 수평최대진폭(단위: μ)으로서 기록지의 수평성분 합성치를 그 주기에 해당하는 비로 나눈 값이다.

29개의 지진에 대하여 이렇게 결정되어진 진앙거리와 규모 등의 지진요소와 지진기록의 시간이력(time history)은 지진원특성을 분석하는데 기초자료가 된다.

표 1. 2000년도 국내지진 발생 현황

연번	진 원 시 (OT)		진 양 (EP)		규모 (M)	발생지역 및 지역별 진도
	월 일	시-분-초	북위	동경		
1	1	18	15-08-49.5	38.7	127.9	3.0 강원 고성 서쪽 약 35km 지역
2	2	21	01-06-30.5	35.8	128.2	2.1 경북 고령 북서쪽 약 6km 지역
3	3	15	01-10-52.3	36.3	125.9	2.5 충남 보령 서남서쪽 약 70km 해역
4	3	21	13-43-56.2	36.5	126.0	2.3 충남 보령 서북서쪽 약 55km 해역
5	4	12	04-44-01.4	36.9	125.3	3.5 충남 격렬비열도 북서 40km 해역
6	4	15	08-05-19.3	36.6	128.3	2.3 경북 문경 동쪽 약 10km 지역
7	4	29	08-53-26.8	35.8	125.7	3.3 전북 군산 서쪽 약 90km 해역(I)
8	5	09	06-55-36.3	35.2	128.1	2.3 경남 진주 북동쪽 약 10km 지역
9	5	11	10-51-17.6	33.3	125.9	3.1 제주도 고산 서쪽 약 30km 해역
10	5	11	15-01-08.4	38.6	127.8	2.9 강원 회양 남동쪽 약 20km 지역
11	5	11	16-00-34.1	38.6	127.8	2.9 강원 회양 남동쪽 약 20km 지역
12	5	19	01-44-23.9	36.6	128.5	2.7 경북 구미 북동쪽 약 25km 지역
13	5	26	21-41-41.0	36.2	127.1	2.4 충남 논산 지역
14	7	24	07-00-00.1	38.5	127.8	3.0 강원 회양 남동쪽 약 30km 지역
15	8	05	21-02-58.5	35.1	124.9	2.7 전남 무안 서북서 약 140km해역
16	8	06	19-35-09.3	36.3	128.4	2.2 경북 군위 북쪽 약 15km지역
17	8	15	01-36-30.4	35.3	125.9	2.2 전남 영광 서쪽 약 55km 해역
18	8	21	19-43-45.0	38.9	125.9	3.4 평양 남동쪽 약 20km 지역
19	9	13	20-38-21.8	35.7	127.1	2.4 전북 전주 남서쪽 약 10km 지역
20	9	23	10-07-44.8	35.6	128.4	2.4 경남 창녕 북서쪽 약 15km 지역
21	10	3	00-01-39.2	36.7	127.2	2.0 충남 천안 남남동쪽 약 15km 지역
22	10	8	07-46-36.8	37.3	128.8	2.6 강원 정선 남동쪽 약 15km 지역
23	10	23	11-35-24.2	37.7	125.7	2.6 황해도 해주 남쪽 약 24km 해역
24	10	28	07-10-11.8	37.1	126.7	2.7 경기도 수원 남서쪽 약 30km 해역
25	11	5	21-39-41.0	36.2	127.2	2.2 충남 논산 동쪽 약 10km 지역
26	11	14	17-41-52.2	38.8	125.8	2.9 평양 남쪽 약 25km 지역
27	12	2	16-53-40.0	34.6	126.9	3.1 전남 장흥 남쪽 약 10km 지역
28	12	9	18-51-00.0	36.5	130.0	3.7 경북 영덕 동쪽 약 60km 해역
29	12	22	08-19-38.5	36.3	127.4	2.7 대전광역시 지역

이 지진들의 지진원 변수 및 공학적 특성들은 다음과 같은 범위 안에 놓인다.

규모 범위 : 2.1 ~ 3.5

진원 깊이 : 0.0 ~ 34.1 (km)

관측소별 진앙거리 : 43 ~ 624 (km)

최대지반속도 분포 : 1,372 ~ 17,629 (μ kine)

최대지반가속도 분포 : 0.79 ~ 8.73 (gal)

주기 분포 : 0.07 ~ 0.36 sec (2.78 ~ 14.2 Hz) in zero crossing method

0.05 ~ 0.26 sec (3.84 ~ 20.0 Hz) in Peak method

5. 응답 스펙트럼 해석

지진해석에서 널리 알려진 응답 스펙트럼 해석(response spectrum analysis)은 각 모드에서의 최대 응답만을 고려하여 근사적으로 전체 응답을 구하는 방법이다. 내진 설계에 많이 사용되는 이 방법은 구조물의 모드 형상과 여러 지반가속도에 대한 응답값을 한눈에 볼 수 있으며 시간과 계산량이 절약되는 장점을 가지나 시간에 따른 동작거동을 고려하지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 지진계의 계기적인 효과 제거를 위하여 입수된 지진자료로부터 저주파, 고주파 통과 필터 및 수진기 필터 등으로 인한 계기응답스펙트럼 보정을 수행하였다. 가속도자료의 경우 이를 그대로 사용하며, 속도자료의 경우 시간 영역에서 미분하여 가속도 시간이력자료로 변환시키기 위하여 Fourier 변환을 통하여 주파수 영역으로 전환한 후 ($i2\pi f$)를 곱해주었다. 지반 가속도 이력을 이용하여 구조물의 가속도, 속도 및 변위 응답 스펙트럼을 각각 계산하고 이를 하나의 그림상에 도시하기 위한 3축 응답 스펙트럼 차트를 사용하였다. 이 결과 29개 지진 이벤트의 358개 지진기록자료 가운데 방향성분별 587개 지진파들의 가속도, 속도 및 변위 응답 스펙트럼이 각각 계산되었다. 지진의 최대 가속도의 절대값을 $1g$ 로 통일하기 위하여 전체 시간이력을 최대 가속도의 절대값으로 나누어 정규화(normalization)하였다.

그림 5은 규모 2.5 이하의 지진에 대한 가속도 응답 스펙트럼의 평균값을 나타낸 것이고 그림 6은 규모 2.5~3.0의 지진에 대한 가속도 응답 스펙트럼, 그림 7는 규모 3.0이상의 지진에 대한 가속도 응답 스펙트럼의 평균값을 나타낸 것이다. 이를 보면 규모가 증가함에 따라 큰 응답을 나타내는 진동수 범위가 넓어짐을 알 수 있다. 이는 Boore⁵⁾가 제시한 규모별 가속도 응답 스펙트럼의 형태와 동일한 특성을 나타낸다고 볼 수 있다. 그림 6은 변위 응답스펙트럼과 pseudo-속도응답스펙트럼, pseudo-가속도응답스펙트럼의 관계를 이용하여 이들을 하나의 그림상에 도시하기 위한 3축 응답스펙트럼의 예를 도시한 것이다.

5. 결론

최근 국내에서 발생한 지진데이터 가운데 신뢰도가 높고 신호 대 잡음비가 높은 지진들을 선택하여 규모별로 가속도응답스펙트럼을 구하였다. 연구결과 관측소의 위치에 따라 지진파의 주기성분에 상당한 차이를 나타내고 있는데 이는 지진파의 전파특성뿐만 아니라 관측소가 위치한 지반의 암반특성에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행된 지진자료의 기초적인 공학적 특성분석의 자료는 추후 미소지진의 특성을 이용한 한국표준응답스펙트럼 및 부지 고유 스펙트럼의 개발 등에 활용될 수 있다.

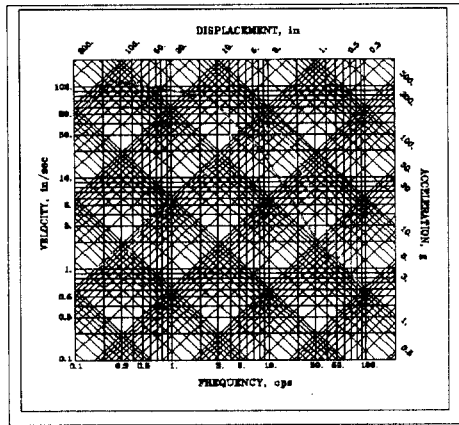


그림 5. 규모 2.5 이하 지진들의 평균 가속도 응답 스펙트럼

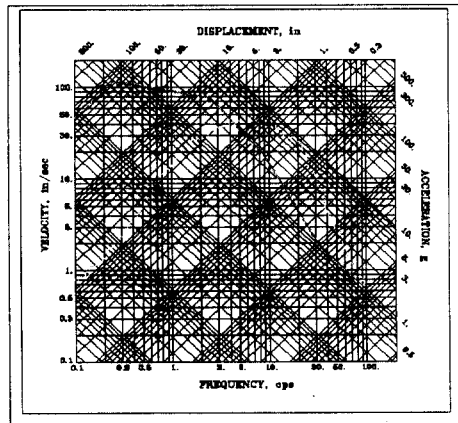


그림 6. 규모 2.5 ~3.0 지진들의 평균 가속도 응답 스펙트럼

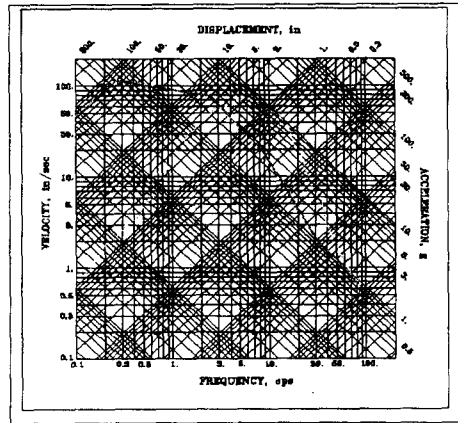


그림 7. 규모 3.0 이상 지진들의 평균 가속도 응답 스펙트럼

참고문헌

1. Kim, S. J., 1980, Seismicity of the Korean Peninsula and its vicinity, Jour. Korean Inst. Mining Geol., 13, pp.51-63.
2. Lee, K., Noh, M., 1988, A probabilistic analysis of the seismic risk in Korea (I), Jour. Geol. Soc. Korea, 24, pp. 62-70.
3. Lee, K. and Jin, Y. G., 1989, A probabilistic analysis of the seismic risk in Korea (II), Jour. Geol. Soc. Korea, 25, pp. 59-71
4. 김상조, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 한양대학교 자원공학과 석사학위논문.
5. Boore, D. M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am. 73, pp. 1865-1894.
6. U.S. NRC(1973), Regulatory Guide 1.60, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants", Rev. 1.