

국내 지진의 지진원 변수 추정

Estimation of Source Parameters of South Korean Earthquakes

이전희*1) 서정문**2)

Lee, Jun Hee Seo, Jeong-Moon

Abstract

The quality factor and the seismic source parameters such as the α , corner frequency and the stress drop were estimated from the small-to-medium instrumental earthquake data in south Korea. The Q factor with 95% confidence level ranges from 1519 to 2158. The regression equation of α in terms of epicentral distance, R, is obtained as $\alpha = 0.006717 + 0.00015R$. And the stress drop is estimated as 50 bar, which is similar to the previous results carried out by independent researchers. Artificial ground motions were simulated using the estimated earthquake parameter values and compared with real earthquake. The simulated response spectrum is very similar to real one.

1. 서론

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.¹⁾ 예측공식을 이용하여 특정 지역의 최대지반운동과 응답스펙트럼을 예측하는 방법에 대한 연구는 미국과 일본 등지에서 많은 지진학자들에 의하여 행하여졌다.^{2), 3)} 예측공식을 개발하기 위해서는 지진의 규모와 진앙거리를 포괄할 수 있는 계기지진 자료가 축적되어야 하나 우리나라의 경우 강지진동 자료의 결여로 인하여 직접적으로 개발하기 어렵다.

지진자료가 부족하여 경험적인 예측공식의 도출이 어려운 지역에서는 대안으로서 인공적

* 기상청 지진담당관실 기상연구사

** 한국원자력연구소 책임연구원, 정회원

으로 지진자료를 합성하는 방법을 사용하여 감쇄식을 도출할 수 있다. 본 연구에서는 계속된 미.소지진 자료를 이용하여 한반도 지진원 변수와 지반매질의 특성을 분석하였고 그 결과를 이용하여 한반도 남부에서 발생한 지진을 모사하였다. 실측 지진과 모사된 지진의 특성을 비교하였다.

2. 자료 분석

본 연구에서는 기상청, 한국자원연구소, 한국전력연구원, 한국원자력안전기술원 및 기타 대학 등의 기관에서 1995년 ~ 1999년까지 계속한 지진 자료 중에서 선정된 23개 지진 217개의 지진기록을 이용하여 분석하였다. 표 1은 분석에 사용된 지진목록을 보인다.

3. 이론 및 분석방법

3-1. 지반운동 가속도 스펙트럼

지반운동의 합성 시 입력자료로 사용될 지진원 요소의 특성과 감쇄인자 등을 결정하기 위한 과정으로써 지반운동의 가속도 스펙트럼을 계산한다. 현재 획득된 디지털 자료는 속도 성분을 기록한 것이므로 푸리에변환(Fourier transform)을 이용하여 지반운동의 가속도 스펙트럼으로 변환 가능하다.

지반으로부터 지진계에 입사하여 기록된 지진자료에는 계기적인 특성이 반영된다. 즉, 지진과 자료는 수진기, 증폭기, 지진기록계, 알리아싱 방지필터(anti-aliasing filter) 등을 통과하여 획득된다. 따라서 지진기록으로부터 이러한 계기적인 효과를 제거하여 지반운동 속도 스펙트럼으로 전환한 후 이를 시간영역에 따라 미분하여 가속도 스펙트럼을 얻는다.

3-2. 코너 주파수(f_c) 및 κ 값 분석

다양한 지진원 모델중 Brune 모델⁴⁾과 ω -제곱 모델에 의한 원거리 진폭스펙트럼을 로그-로그 그래프에 도시하였을 때 소위 코너주파수(f_c)라 불리는 지점에서 두 직선이 교차하는 형태를 띤다. 그림 1은 이러한 모델에 의한 푸리에 진폭스펙트럼(Fourier amplitude spectrum) 중 변위(FD)와 가속도(FA)에 대하여 이상화한 것을 도식적으로 나타낸 것이다.

Anderson 등⁵⁾은 FA 를 세미로그(semi-log) 그래프 상에 도시하는 방법을 제안하였다. 그림 2는 세미로그 그래프 상에 하나의 지반가속도 진폭스펙트럼의 예를 도시한 것이다. 이 방법에서는 FA 의 로그값이 선형적으로 변화한다. 이러한 선형 감쇄현상은 FA 값이 지수

함수적으로 감소하는 것을 의미하며 그 시작주파수는 f_c 근처이거나 그 이상의 고주파수일 수 있다는 점에 주목하였고 f_E 라고 칭하였다. 이들은 고주파 영역에서의 가속도 진폭스펙트럼이 일반적으로 다음과 같은 식으로 기술될 수 있음을 가정하였다.

$$FA = A_0 e^{-\pi x f}, \quad f > f_E \quad (1)$$

여기서, A_0 는 진원의 특성과 진앙거리 등 여러 가지 요소에 의존하는 계수이며, x 는 스펙트럼의 감쇄인자(spectral decay parameter)이다.

x 를 구하기 위하여 사용된 지진자료는 표 1과 같이 23개 이벤트의 217개 지진기록자료이다. 그림 3은 1999년 6월 2일 발생한 지진 자료(EQ 21)를 이용하여 x 를 구하는 방법을 대표적으로 보인 것이다.

x 가 진앙거리에 의존한다고 단정할 수는 없지만 의존 경향을 살펴보기 위하여 그림 4와 같이 선형 회귀분석을 수행하였다. 진앙거리(R)에 대한 x 의 회귀분석식은

$$x = 6.7166 \times 10^{-3} (\pm 3.4371 \times 10^{-3}) + 1.5087 \times 10^{-4} (\pm 1.4286 \times 10^{-5})R \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 여기서 x 와 R 의 단위는 각각 초와 km이다. 식 (2)에서 보듯이 표준편차의 값이 계수에 비하여 다소 높게 나타나지만 회귀직선에 의한 결정계수(coefficient of determination)는 0.73으로 계산되며, 이 수치는 x 와 진앙거리 R 사이에 회귀관계가 높음을 나타낸다. 95% 신뢰구간을 취할 경우 $0.00010538 < x < 0.00016748$ 가 되며 이를 Q 값으로 변환하면 $1519 < Q = 1892 < 2158$ 가 된다.

3-3. 외견응력강하 분석

응력강하량이란 지진 전후에 단층면에 작용하는 전단 응력차를 말한다. 과거 Noh⁶⁾는 외견응력강하(apparent stress drop), 코너주파수, 지진 모멘트 사이의 관계식,

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma / M_0) \quad (3)$$

을 이용하여 한반도 남동부 지역에서의 외견응력강하 값을 50 bars로 추정하였다. 식 (3)에

서 f_c , β , $\Delta\sigma$, M_0 등은 각각 코너주파수(Hz), 전단파 속도(km/sec), 외견응력강하(bars), 지진모멘트(dyne-cm)를 나타낸다. 한편, Jun 등⁷⁾은 한반도 내부와 근처 지진에 대한 스펙트럼 분석을 통하여 응력강하를 8-56 bars로 추정하였다.

식 (3)과 같은 방법으로 추정된 응력강하는 엄밀한 의미의 응력강하보다는 고주파 지반운동의 강도를 계측하는 수치정도로 고려되어야 하기 때문에 '외견'이라는 접두어를 붙였다. 본 연구에서는 외견응력강하 값으로써 상수값을 가정한다. 균일응력 모델(constant -stress model)은 주로 판경계부 지진의 $M_0 - f_c$ 관계를 분석하는데 기반을 둔다.

4. 지진동 모사

본 연구에서는 전산 프로그램 SMSIM13을 이용하여 응답스펙트럼을 추정하였다. 이 방법은 Boore⁸⁾에 의하여 제시되어, 후에 Boore and Atkinson⁹⁾에 의하여 부분적으로 개선된 방법이다. 그 후에도 수 차례 걸친 수정이 이루어 졌으나, 그 기본적인 골격은 변하지 않았다.

이 방법은 지진동의 고주파 성분이 추계학적 과정(Stochastic Process)을 따른다는 가정하에서, 백색 가우스 잡음(White Gaussian Noise)을 이용하여 고주파 지진동을 모사하는 방법이다. 또한 이 방법에 의하여 생성된 지진동은 전단파(Shear Wave)를 나타내는데, 구조물에 영향을 주는 대부분의 지진 에너지가 전단파에 의하여 전달되므로 공학적 목적에 매우 적합한 방법이라 할 수 있다.

관측치와 추정치를 비교할 때 본 연구에서는 최대지반가속도(peak ground acceleration)를 그 대상으로 하였다. 앞에서 기술한 것처럼 지반가속도의 관측치는 보정된 값이다. 또한 지반운동 모사 프로그램으로부터 산출된 최대지반가속도의 추정치를 SH파로 가정하였으므로 비교 대상이 되는 최대지반운동의 관측치를 각 지진기록의 수평성분(남북성분, 동서성분)중에서 그 최대값으로 정하였다.

본 연구에서 지반운동 생성모사에 사용된 지진원 변수의 값들은 다음과 같다.

| | |
|--|--------------------------|
| $M=3.0(M_0=1.12 \times 10^{22} \text{ (dyne-cm)})$ | $Q=1900$ |
| $\Delta\sigma=50 \text{ bar}$ | $\beta=3.2\text{km/sec}$ |
| $\rho=2.7\text{g/cm}^3$ | $T=48(\text{sec})$ |
| $f_{\max}=15 \text{ Hz}$ | $T_s=3 \text{ sec}$ |
| $R=30 \text{ km}$ | $\Delta t=0.01$ |

1999년 6월 17일 발생된 지진 (EQ 22, 규모 2.7)과 인공 지진파를 대표적으로 비교하였다. 그림 5 및 6은 인공 및 실측 지진파의 응답스펙트럼을 나타내고 그림 7 및 8은 각각의 지진

파형을 나타낸다. 비교 결과 인공지진파의 응답스펙트럼은 실측 지진파와 매우 흡사한 모양을 나타내었으나 지진파형은 상당히 다른 모습을 보였다. 이는 파형이 변수들에 있어 non-unique하다는 점과 파형을 결정하는데 있어 여타 지진원 변수값보다 time window function과 envelope function이 더 중요하다는 점에서 이해할 수 있다.

5. 결론

최근 국내에서 발생한 지진데이터 가운데 신뢰도가 높고 신호 대 잡음비가 높은 지진들을 선택하여 지진원 변수를 추정하였다. Anderson의 가속도값을 세미로그축에 도시하는 방법을 이용하여 코너 주파수 및 x 값을 구하였다. 또한 외견응력값을 50bar로 구하였는데 이는 과거 다른 연구자들의 연구결과와 비교적 잘 일치한다. 인공지진파를 모사한 결과 모사된 응답스펙트럼의 모양은 실제의 것과 매우 흡사한 모양을 나타내었다.

향후 관측소가 증가하고 양질의 자료가 누적되어 감에 따라 더욱 신뢰도 높은 결과가 도출될 것으로 생각된다. 또한 앞으로 지진자료가 축적되면 이를 이용하여 한반도에서 규모와 진원거리에 대한 지진원 감쇄식의 수정 또는 새로운 감쇄식의 개발이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 수행하는 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. Aki, K., 1983, Strong-motion seismology, in Earthquakes : Observation, Theory and Interpretation, H. Kanamori and E. Boschi(editors), Proprieta Letteraria Riservata, Italy.
2. Joyner, W. B. and Boore, D. M., 1981, Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 71, pp. 2011-2038.
3. Crouse, C. B., Vyas, Y. K. and Schell, B. A., 1988, Ground motions from subduction-zone earthquakes, Bull. seism. Soc. Am., 78, pp. 1-25.
4. Brune, J. N., 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, Jour. Geophys. Res., 75, pp. 4997-5009.
5. Anderson, J. G. and Hough, S. E., 1984, A model for the shape of the Fourier

- amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, Bull. Seism. Soc. Am., 74, pp. 1969-1993.
6. Lee, K., Noh, M., 1988, A probabilistic analysis of the seismic risk in Korea (I), Jour. Geol. Soc. Korea, 24, pp. 62-70.
 7. Jun, M. -S. and Kulhánek, O., 1991, Source parameters in and around the Korean Peninsula deduced from spectral analysis, Phys. Earth Planet. Inter., 65, pp. 255-266.
 8. 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.
 9. Boore, D. M. and Atkinson, G. M., 1987, Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in eastern North America, Bull. Seism. Soc. Am., 77, pp. 440-467.

표 1. 연구에 사용된 지진들의 지진요소 값들

| EVENT | Origin Time | | Epicenter | | Mag. | Station 갯수 |
|-------|-------------|-------------|-----------|-----------|------|------------|
| | Y/M/D | H:M:S | Lat. | Lon. | | |
| 1 | 96/01/24 | 05:09:51.07 | 38-05.00 | 129-33.65 | 4.8 | 7 |
| 2 | 96/02/27 | 04:39:33.98 | 35-57.00 | 129-29.55 | 3.0 | 6 |
| 3 | 96/05/13 | 00:49:27.12 | 35-50.00 | 130-21.90 | 3.9 | 4 |
| 4 | 96/05/16 | 11:05:43.27 | 35-18.50 | 129-06.91 | 3.0 | 4 |
| 5 | 96/10/16 | 04:45:30.40 | 36-12.43 | 128-18.83 | 3.8 | 2 |
| 6 | 97/05/09 | 21:40:07.11 | 35-17.64 | 129-19.45 | 3.8 | 4 |
| 7 | 97/10/11 | 19:50:28.76 | 35-55.05 | 128-50.69 | 2.7 | 8 |
| 8 | 97/10/18 | 19:35:31.31 | 37-13.11 | 127-53.35 | 3.0 | 6 |
| 9 | 98/01/13 | 13:18:01.08 | 35-56.67 | 128-44.37 | 3.2 | 5 |
| 10 | 98/01/22 | 13:24:13.06 | 35-36.64 | 127-34.52 | 2.9 | 4 |
| 11 | 98/04/02 | 13:23:14.09 | 36-26.53 | 126-26.26 | 4.2 | 3 |
| 12 | 98/05/14 | 23:23:44.14 | 37-26.56 | 128-26.45 | 3.2 | 4 |
| 13 | 98/06/07 | 21:25:58.13 | 36-16.74 | 128-45.30 | 3.3 | 3 |
| 14 | 98/06/21 | 17:23:24.22 | 36-46.88 | 127-34.27 | 2.9 | 3 |
| 15 | 98/07/10 | 19:16:15.79 | 35-56.67 | 129-33.37 | 3.1 | 3 |
| 16 | 98/07/30 | 21:18:13.83 | 34-36.55 | 128-46.85 | 2.0 | 5 |
| 17 | 98/09/09 | 24:15:12.25 | 34-01.56 | 126-55.34 | 4.1 | 3 |
| 18 | 98/10/02 | 21:06:11.32 | 35-24.53 | 129-14.43 | 2.8 | 4 |
| 19 | 98/12/25 | 12:06:09.26 | 36-51.36 | 128-07.31 | 3.5 | 4 |
| 20 | 99/04/21 | 14:08:17.31 | 35-34.45 | 127-03.25 | 2.8 | 6 |
| 21 | 99/06/02 | 03:05:12.25 | 35-39.52 | 129-23.81 | 3.4 | 8 |
| 22 | 99/06/17 | 04:17:10.25 | 36-45.36 | 128-33.55 | 2.7 | 7 |
| 23 | 99/09/10 | 09:20:08.17 | 36-46.15 | 129-43.92 | 3.1 | 9 |

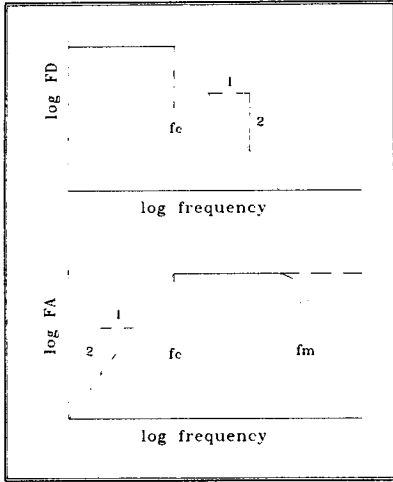


그림 1. 이상화된 변위(FD) 및 가속도(FA) 스펙트럼

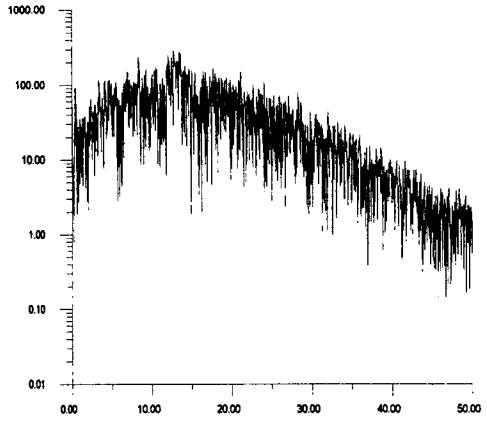


그림 2. 선형 회귀분석을 수행하기 위한
지반가속도 진폭 스펙트럼

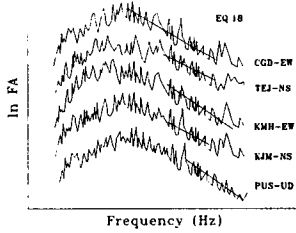


그림 3. 지진 EQ21에 대한 기록 중 각 관측소의
남북성분 지반가속도의 진폭스펙트럼.
(관측소 명 및 성분은 그림의 우측에 표시)

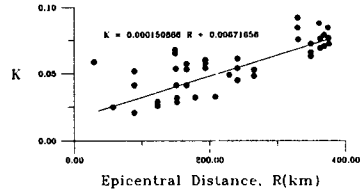


그림 4. 선형회귀분석에 의한
 κ 와 진앙거리와의 관계

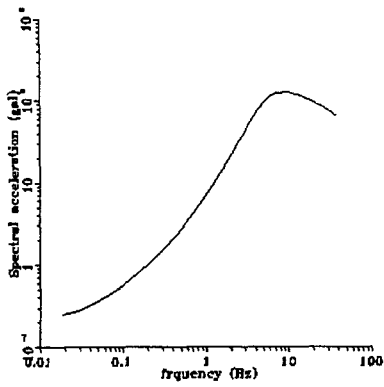


그림 5. 모사된 지진의 응답 스펙트럼

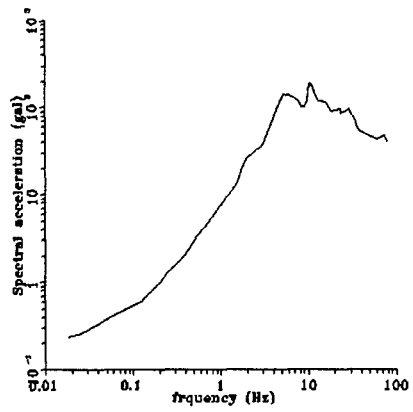


그림 6. 1999년 6월 17일 BBK지진계에 감지된 지진의 응답 스펙트럼

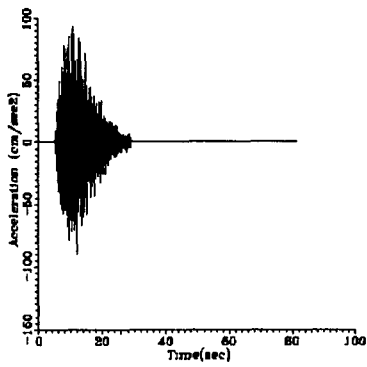


그림 7. 모사된 지진의 지진파형

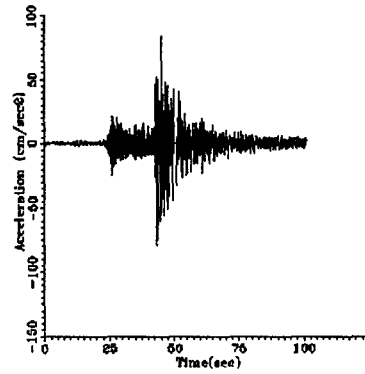


그림 8. 1999년 6월 17일 BBK지진계에 감지된 지진의 지진파형