남한 중부지역 미소지진들의 응답 스펙트럼 및 시간 - 주파수 영역에서의 특성에 관한 연구

A Study of Response Spectrums and Characteristics of Time-Frequency Domain of Microearthquakes in the Central Part of South Korea

이전희[1)] 경재복[2)]
Lee, Jun Hee Kyung, Jae Bok

ABSTRACT

The microearthquake and explosion events recorded in the seismic KNUE(Korea National University of Education) network were analyzed. The seismic data were recorded from Dec. 1997 to Dec. 1998. Total of 118 records consisted of 24 earthquake and 4 explosion events were instrumented at 6 stations. Spectral values increases as magnitude increases, and the predominant frequency band expands to low frequency zone as magnitude increases. Three-dimensional spectrograms(time, frequency, amplitude) were also synthesized in order to discriminate microearthquakes and artificial underground explosions. The waves from microearthquakes show that frequency content of dominant amplitude appeared above 10 Hz and the discrimination can be performed in almost all the frequency domain of 3-d spectrogram.

1. 서 론

지금까지 지진위험도에 대한 연구는 주로 우리나라에서 발생한 역사지진을 분석함으로서 수행되었다. 이 방법은 조사 지역을 격자점으로 나누어 통계적 방법을 이용하여 각 격자점에서의 지진의 재래주기(return period)나 최대 가능 지진(maximum possible earthquake)을 계산, 이 값들의 지역적 분포를 등고선식으로 도면화하는 것이다. 그러나 지진위험도의 엄밀한 평가를 위해서는 이들 자료보다는 미래에 발생 가능한 최대 지반운동(peak ground motion) 및 응답 스펙트럼(response spectrum)을 추정하는 예측공식(predictive equation)을

1) 한국 원자력 연구소 Post-Doc.
2) 한국 교원대학교 교수, 정회원

발견해야 하는데 이를 위해서는 지진계에 기록된 계기지진들의 파형 자료들이 필수적이다.

우리나라에서는 원자력발전소의 설계시 우리나라고유의 표준응답, 부지고유 스펙트럼이 없으므로 US NRC의 표준응답 스펙트럼을 사용하고 있다. 그러나 US NRC에서 제시하고 있는 표준응답 스펙트럼은 주로 미국 서부지역에서 발생한 강진기록을 토대로 작성된 것이었다. 특정 지역에서 경험적으로 얻어진 예측공식을 그대로 다른 지역에 적용하여 사용하는 것은 지진학적 견지에서 볼 때 타당성이 있다고 할 수 없다. 이에 따라 우리나라에서도 자체적인 지진, 지질환경 특성을 고려한 지반응답 스펙트럼의 개발이 요구되고 있다.

이러한 표준응답 스펙트럼의 개발을 위해서는 강진기록을 분석하거나 추계학적(stochastic)인 인공지진파 합성기법을 이용하여 내진설계를 위한 강진 특성을 도출하여야 하는데 이 때 필요한 변수값들은 미소지진기록에 대한 분석을 통하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 우리나라에 적합한 지반응답 스펙트럼의 한국교원대에서 1997년부터 1998년까지 기록된 지진자료를 바탕으로 하여 응답 스펙트럼을 구하고 또한 주파수 영역에서 발파와 지진과의 구별을 하기 위한 것이다.

2. 한국교원대학교 지진관측망

최근까지 한반도의 지진활동에 대한 디지털 기록의 체계를 갖춘 것은 1990년대에 이르러서의 일이다. 대표적인 기록으로는 1991 - 1992년 한일 공동으로 수행한 POSEIDON 프로젝트의 일환으로 설치한 임시 관측망에 의한 자료와 1994년부터 현재까지 경상분지에 설치된 한국자원연구소의 지진망으로부터 관측된 자료를 그 예로 들 수 있다. 경상분지에서의 지속적인 지진관측과 지진활동 및 지반운동에 대한 연구는 이 지역에 건설되었거나 계획중인 원자력 발전소 부지의 적합성과 내진 설계 기준치와 관련되어 중대한 관심사로 대두되어 왔다(전명순 외, 1993, 1994), 김성균 외, 1997). 따라서 현재 우리나라의 지진관측은 기상청에서 전국에 운영하고 있는 12개의 관측소와 한국자원연구소에서 경상분지에 운영하고 있는 관측소에 의해 대표적으로 이루어지고 있다고 할 수 있다.

한국교원대학교에서는 1996년 1월부터 2개소에 지진계를 설치하여 지진관측을 시작하였으며, 1997년 6월 이후로는 전체 6개소의 관측소를 이용한 지진관측망을 구축하고 있다. 현재 각 관측소의 위치는 충남 연기군 서면 기룡리(36° 33.98′N, 127° 14.00′N)에 조치원 관측소 1기, 충북 옥천군 청성면 거포리(36° 19.89′N, 127° 44.43′N)에 옥천 관측소 1기, 충북 괴산군 괴산읍 서부리(36° 48.17′N, 127° 47.44′N)에 괴산 관측소 1기, 충남 논산군 양촌면 임화리(36° 07.04′N, 127° 12.85′N)에 논산 관측소 1기, 충남 예산군 덕산면 상가리(36° 43.94′N, 126° 37.93′N)에 덕산 관측소 1기, 충북 강내면 다락리(36° 36.54′N, 127° 21.64′N)에 교원대 관측소 1기가 있으며 이들은 모두 3성분 속도 지진계로 설치되어 남한 중부지역의 미소지진활동을 관측하고 있다(Fig. 1).

이들 지진관측망으로부터 1997년 12월부터 1998년 12월까지 기록된 지진 데이터를 정리해 본 결과 잡음 등을 제외하고 3개소 이상의 관측소에 기록된 미소지진이 총 24회, 발파로

생각되는 기록이 4회 관측되었으며 이들 관측망을 통하여 얻은 지진기록의 숫자는 총 118개이다.

3. 응답 스펙트럼

불규칙한 지진동의 특성을 파악하거나 미리 구조물의 응답량을 예측하기 위하여 응답스펙트럼(response spectrum)이 요구된다.

응답 스펙트럼이란 지진공학 연구에 있어서나 건축 구조물 설계에서 강지진 개념을 적용시킬 때 매우 유용한 개념이다. 응답 스펙트럼은 강지진학이나 지진공학에서 매우 유용함이 증명되어 전세계적으로 큰 지진이 발생하면 거의 그 즉시 응답스펙트럼이 계산되어 발표되고 있다. 1934년대에 Hugo Benioff는 지진학에 스펙트럼의 개념을 적용하였고 1941년에 M.A. Biot는 지진 공학 분야에 그 응용의 범위를 확장하였다. 이들은 미래에 강한 지진이 발생할 때에 그 움직임을 파악하기 쉽게 해준다.

응답 스펙트럼의 개념은 비교적 단순하다. 이는 주어진 지진동에 대한 선형 단자유도계(linear elastic single-degree-of-freedom system)의 최대응답으로 표현될 수 있다. 즉 어떤 구조물의 기초에 입사한 지진동에 대한 구조물의 반응을 감쇠진동자(damped oscillator)에 외부력이 작용하는 형상으로 설계할 때 이 시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{u}+2\zeta\omega_n\dot{u}+\omega_n^2 u=-\ddot{u}_g(t) \qquad (1)$$

이 때, u = 구조물의 상대적변위

$\ddot{u}_g$ = 입력된 지진동가속도

ζ= 임계감쇄율

ω_n = 시스템의 고유각 진동수(natural angular frequency)

이 된다. 이러한 식으로부터 응답 스펙트럼을 계산하는 방법은 Nigam and Jennings(1969)의 적분 방법에 따라 풀 수 있다. 이 방법을 쓸 경우 해답은 입력 지진동 가속도로부터 수학적인 방법으로 반복적인 계산에 의해 주어진다.

공학적인 목적에서 우리가 관심을 가지는 것은 응답 변수들의 시간적인 변화보다는 중요한 정보를 전달할 수 있는 응답의 극대값이다. 응답의 극대값은 구조물이 지탱해야 할 최대력(maximum force) 또는 최대변위, 또는 최대변형량을 나타내기 때문이다.

한국 교원대학교에 설치되어 있는 지진계는 속도성분으로 작성되어 있으며 각각의 속도기록을 시간에 대하여 미분 및 적분을 하여 가속도 및 변위 시간이력을 작성할 수 있으며 이렇게 작성된 가속도 시간이력을 이용하여 지반가속도 응답 스펙트럼을 작성할 수 있다.

본 연구에서는 총 118개 지진 및 발파 기록의 가속도 응답 스펙트럼(5% Damping)을

작성하고 이를 규모별로 분류하여 분석하였다. Fig. 2는 규모가 3.0 이하인 지진들의 평균 응답 스펙트럼을 구한 것이고 Fig. 3은 규모가 3.0과 4.0 사이에 있는 지진들의 평균 응답 스펙트럼, Fig. 4는 규모 4.0 이상인 지진들의 평균 응답 스펙트럼을 구하였다. 이를 보면 규모가 증가함에 따라 응답의 값이 커지는 것을 볼 수 있으며 규모 3.0 이하의 경우 5Hz 이상에서 큰 응답을 나타내고 있으나 규모가 증가함에 따라 큰 응답을 나타내는 진동수 범위가 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 Boore(1983)가 제시한 규모별 가속도 응답스펙트럼의 형태와 동일한 특성을 나타내는 것으로서 이를 이용한 강진에 대한 가속도 응답 스펙트럼의 작성이 가능함을 보여주고 있다.

4. 지진과 인공폭발의 구별

지진계에 기록된 여러 관측자료로부터 미소지진의 지진요소를 결정하기 위하여 자료에서 지진으로 확인되는 자료들을 구별, 분리하여야 한다. 일반적으로 기록계에 기록되는 여러 신호들에는 주변에서 발생한 잡음, 혹은 발파기록, 혹은 미진 기록이 있을 수 있다. 주변에서 발생한 잡음은 파형의 특성상 불규칙하고 P, S파의 파형을 전혀 구별할 수 없는 것이어서 불필요한 자료이다. 그러나 발파에 의한 진동 자료와 자연지진에 의한 기록을 구별하기 쉽지 않은 경우도 많이 있다.

한반도에서 지진과 인공폭발의 식별 연구는 Kim(1994)에 의하여 처음으로 이루어진 것으로 알려져 있다. 그는 순수한 대륙을 통과하는 지진파의 특성을 이용하여 북한의 지하 폭발로부터 지진을 구별하였으며 지진 신호는 파선 경로보다는 지진 발생 기구에 의해 더욱 많은 영향을 받는다고 했다. 또한 Kim and Park(1997)은 에너지 진폭 비를 이용하여 연속 폭발시킨 채석장 발파와 미소 지진의 식별을 시도한 바 있다.

본 연구에서는 인공 발파와 미소지진의 주파수 특성을 연구하기 위하여 지진 기록을 주파수 - 시간에 따라 계산하였다. 이 방법은 근거리 또는 국지에서 관측된 모든 지진파형의 주파수 성분을 연구하는데 유용하다. 스펙트럼 추정은 약 4초 크기의 시간 창을 이동시키는 이동 창 (moving window)을 이용하여 계산하였다. 시간 창의 이동은 약 75%씩 중복하여 연속적으로 실시하는 "adaptive multi-taper spectral estimation method"라 불리는 방법을 적용하였다. 다음은 연속 곡면 격자 알고리즘을 이용하여 시간 - 주파수의 3차원 스펙트로그램을 만드는 것이다. 본 연구에서 사용한 모든 스펙트로그램 작성법은 Kim et al.(1994)의 방법을 따랐으며 이들은 신호의 속도 스펙트럼과 관련된다.

Fig. 5는 교원대학교 관측망에서 기록된 미소지진 기록의 1에서 50 Hz까지 3차원 스펙트로그램의 평균값을 보여주고 있다. 이 그림의 특징으로는 10 Hz이상에서 가장 큰 진폭이 관측되었으며 또한 가까운 거리에서 뚜렷한 Rg파가 관측되었다. Fig. 6은 발파 기록의 평균 3차원 스펙트로그램을 나타낸 것인데 이 그림에서 보듯이 10 Hz 이하에서 큰 진폭이 관측되었다. 이 그림에서 보듯이 3차원 스펙트로그램은 지진과 발파를 구별하는데 사용될 수 있을 것으로 보인다.

5. 결 론

한국 교원대학교 지진 관측망에 기록된 남한 중부 지역의 지진 및 발파 자료들의 스펙트럼 분석을 통하여 그 주파수 특성을 분석해 보았다.

응답 스펙트럼의 경우 규모가 증가함에 따라 응답의 값이 커지는 것을 볼 수 있으며 규모 3.0 이하의 경우 5Hz 이상에서 큰 응답을 나타내고 있으나 규모가 증가함에 따라 큰 응답을 나타내는 진동수 범위가 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 이를 이용한 강진에 대한 가속도 응답 스펙트럼의 작성이 가능함을 보여주고 있다.

지진과 발파의 구별을 위한 3차원 시간 주파수 스펙트로그램을 작성한 결과 미소지진의 경우 10 Hz이상에서 가장 큰 진폭이 관측되었으며 발파 기록의 경우 10 Hz 이하에서 큰 진폭이 관측되었다. 이 결과에서 3차원 스펙트로그램은 지진과 발파를 구별하는데 사용될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

1. 김성균, 전명순, 김우한, 조봉곤, 김준경, 1997, 영월지진과 최근 한반도의 지진활동, 한국지진공학회지 1권 1호, 3-14.
2. 김소구, 1998, 계기지진 자료정리 및 분석 연구, 양산단층의 지진위험도 결과보고서, 789-807.
3. 박정옥, 최인길, 서정문, 경상분지내 미소지진의 공학적 특성, 한국지진공학회
4. 전명순, 정승환, 지헌철, 전정수, 신인철, 1993, 지진연구, 한국자원연구소, KR-92-1G-3.
5. 전명순, 지헌철, 전정수, 신인철, 1994, 지진연구, 한국자원연구소, KR-94(C)1-16.
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, 1865, 1894.
7. Kim, W.Y., Simpson, D.W. and Richards, P.G., 1994, High-Frequency Spectra of Regional Phases from Earthquakes and chemical explosion, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 1365-1386.
8. Kim, S.G. and Park, Y.C., 1997, discrimination of local microearthquakes and artificial underground explosions on the basis of time frequency domain, The Jounal of engineering geology, 7, 63-79.
9. Nigam, N.C. and Jennings, P.C., 1969, Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records, Bull. Seism. Soc. Am., 59, 909-922.

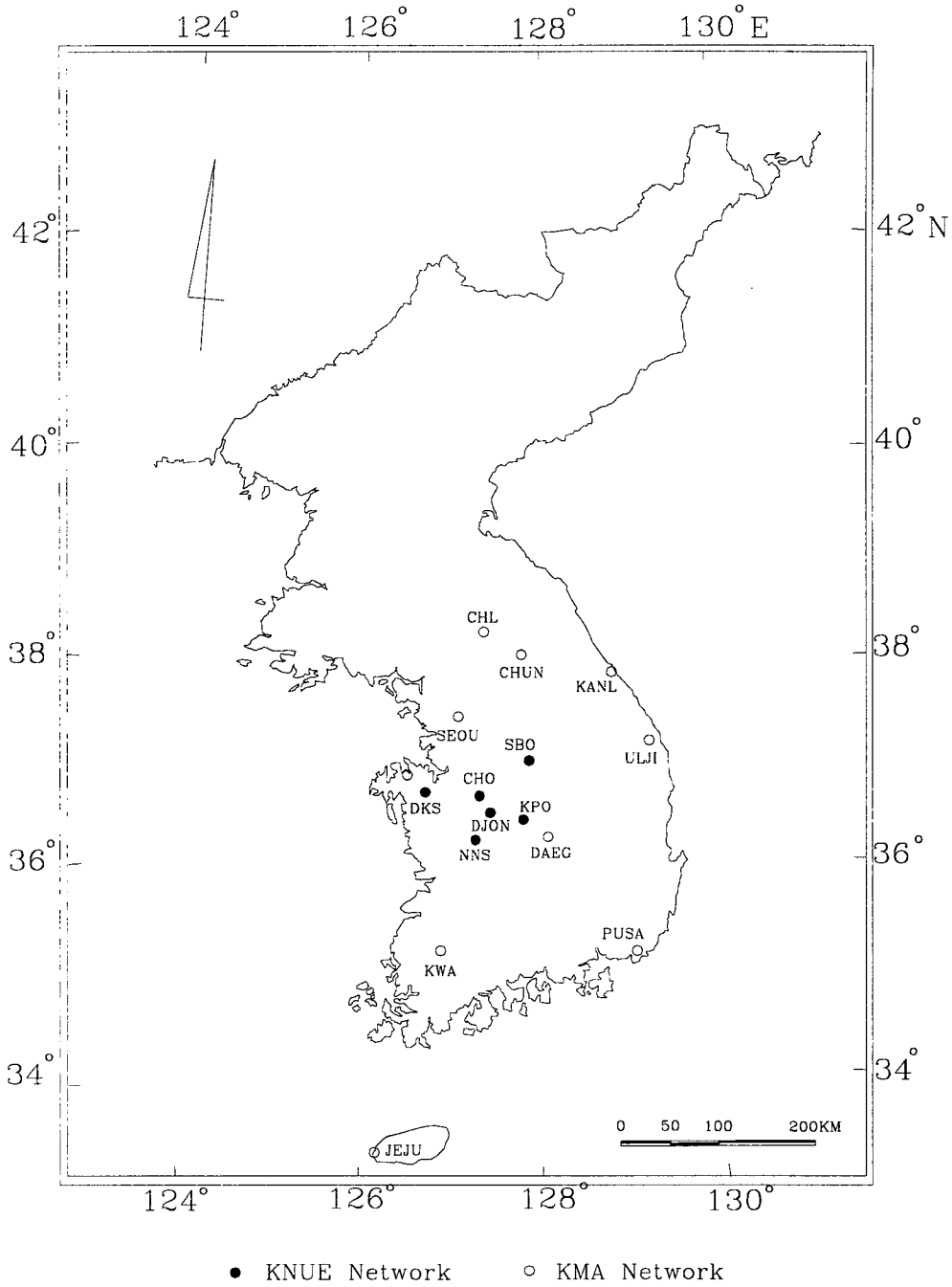

Fig. 1. Locations of seismic observation of KNUE and KMA networks

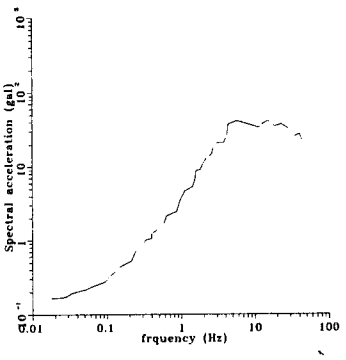

Fig. 2. Average acceleration response spectrum whose magnitudes are below 3.0

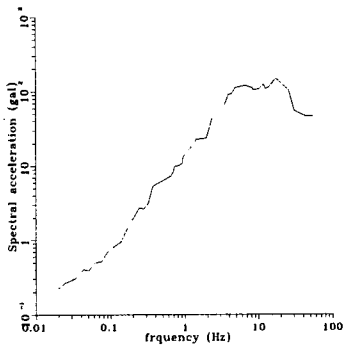

Fig. 3. Average acceleration response spectrum whose magnitudes are between 3.0-4.0

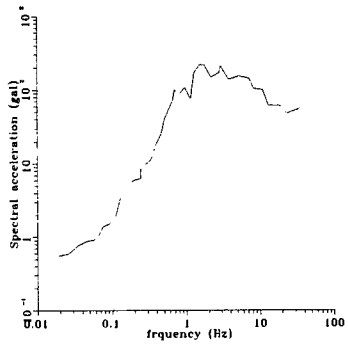

Fig. 4. Average acceleration response spectrum whose magnitudes are above 4.0

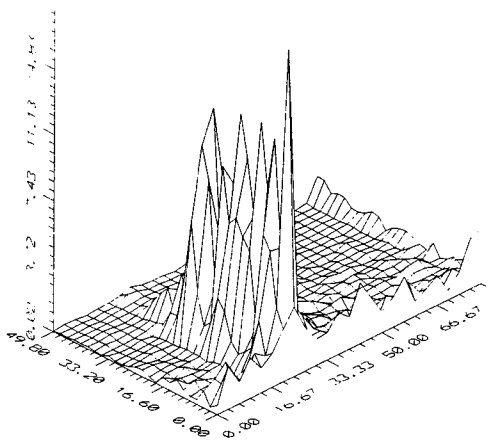

Fig. 5. Spectrograms from average microearthquakes recorded in the KNUE network

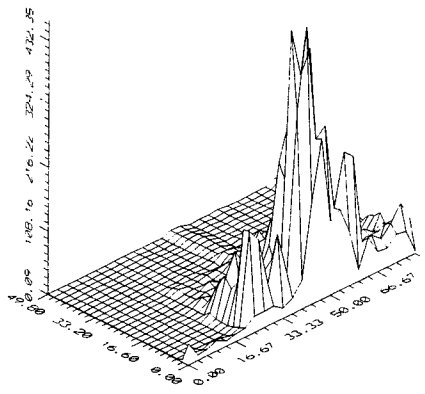

Fig. 6. Spectrograms from average quarry blasts recorded in the KNUE network