

# 유사 강지진동을 이용한 수평 및 수직지반응답의 Amplification Factor 스펙트럼 분석

## Analysis of Amplification Factor Spectrum Using Strong Ground Motions Compatible to the Domestic Seismotectonic Characteristics

김 준 경\*      박 창 업\*\*      조 봉 곤\*\*\*      지 현 철\*\*\*\*  
Kim, Jun Kyoung      Baag, Chang Eob      Jo, Bong Gon      Ji, Heon Cheol

### 국문요약

실제 관측된 강지진동을 이용하여 증폭요소 스펙트럼을 구하였으며 그 결과를 미국에서 개발된 표준응답 스펙트럼과 비교 및 분석하였다. 본 연구를 위하여 국내의 지진지체구조특성을 충분히 대표 가능한 지진을 선택하였으며 구체적으로 Miramichi, Nahanni, Saguenay 및 New Madrid Earthquake (19 수직성분, 36 수평성분)으로부터 관측된 강지진동을 증폭요소 스펙트럼 분석에 이용하였다. 국내의 지진지체구조특성을 충분히 대표 가능한 지진으로부터 관측된 강지진동을 처리하여 수평 및 수직 성분에 대한 응답을 계산하고 응답결과를 각각의 성분에 대하여 실제 관측된 강지진동값과 비교를 통하여 증폭요소 스펙트럼을 구하였다. 구하여진 증폭요소 스펙트럼을 미국에서 개발된 표준응답 스펙트럼과 비교 분석한 결과 수평 및 수직성분 공통적으로 약 10Hz 이상의 대역에서 본 연구로부터 구하여진 증폭요소 스펙트럼이 표준응답 스펙트럼에서 제시된 값보다 더 초과하고 있음을 보여 주었다. 이러한 결과는 국내의 지진지체구조를 대표하는 지진이 향후 발생하여 이 지진으로부터 관측가능한 강지진동을 이용하여 응답스펙트럼을 분석할 경우 특히 약 10Hz 이상의 대역에서 구하여진 증폭요소 스펙트럼이 표준응답 스펙트럼이 제시한 값보다 초과할 가능성이 있음을 의미한다.

**주요어 :** 표준응답스펙트럼, 증폭요소 스펙트럼, 지진지체구조 특성

### ABSTRACT

Amplification factor spectrum, using the observed strong ground motions database, has been obtained and compared with Standard Response Spectrum. The observed ground motions from the Miramichi, Nahanni, Saguenay and New Madrid Earthquake (19 vertical components, 36 horizontal components), which are estimated to represent domestic seismotectonic characteristics such as seismic source, attenuation, and site effect, are used for the analysis of amplification factor spectrum. Amplification factors have been calculated by comparing the observed peak ground motions with results from responses to the observed horizontal and vertical ground motions. The comparison shows that the amplification factors resultant from this study exceed those of Standard Response Spectrum at relatively higher frequencies. The result implies that the characteristics of the seismic strong ground motion, which may represent the domestic seismotectonic characteristics differ from those of Standard Response Spectrum, especially at higher frequencies.

**Key words :** standard response spectrum, amplification factor spectrum, seismotectonic characteristics

\* 정희원 · 세명대학교 자원환경공학과 교수  
\*\* 정희원 · 서울대학교 지질학과 교수  
\*\*\* 정희원 · 전북대학교 지구환경과학과 교수  
\*\*\*\* 정희원 · 한국자원연구소 방재지질연구소

## 1. 서 론

응답 스펙트럼은 효과적인 내진 설계를 위하여 필요한 여러 가지 요소 가운데 하나의 중요 요소로서 국내에서도 최근까지 응답스펙트럼에 대하여 연구가 계속되어 왔다. 하지만 응답스펙트럼 개발을 위하여 실제 관측된 강지진동 자료가 필수적이나 국내에서 관측된 의미있는 강지진동 자료가 거의 축적되어 있지 않았기 때문에 효과적으로 응답스펙트럼을 개발하기 위하여 어려운 점이 있다.

물론 응답 스펙트럼을 적용하고자 하는 산업의 종류마다 다소 차이가 있지만 국내 원자력 산업의 경우 내진 설계를 위해 원전 도입국이 개발하여 적용하고 있는 표준응답 스펙트럼을 국내 고유의 최대잠재지진 값에 스케일하여 적용하고 있다. 하지만 적용 응답스펙트럼에 대한 적절한 기술적 검토 없이 외국의 응답스펙트럼의 모양특성을 그대로 적용하고 있는 실정이기 때문에 국내의 지진지체구조 특성 (Seismotectonic Characteristics)에 적합하고 충분히 대표할 수 있는 응답스펙트럼 개발에 대한 연구가 시급히 필요하다.

Blume et. al.<sup>(1)</sup>, Mohraz et. al.<sup>(2)</sup> 및 Newmark et. al.<sup>(3)</sup> 등에 의하여 실제 관측된 강지진동을 처리하여 구조물의 주파수별 응답을 대표하는 응답 스펙트럼에 대한 연구가 수행되어 왔다. 예를 들면 실제 관측된 강지진동을 통계적으로 처리하는 방법을 이용하여 미국의 원자력규제위원회 (US NRC)가 원전 부지의 적합성 평가 관련 기술 기준 가운데 하나로서 표준 응답 스펙트럼 (Reg Guide 1.60)을 개발하였다. 이는 북미 대륙 내에서 실제 관측된 100여개의 강지진동을 처리를 통하여 개발되었다.

하지만 표준응답 스펙트럼이 개발된 이후에도 중규모 이상의 지진이 계속 발생하여 관측 강지진동에 대한 데이터베이스가 대폭 증가하였고 대폭 증가된 강지진동 자료를 분석하여 응답스펙트럼에 특성에 대한 연구가 계속되었다. 이러한 연구결과 가운데 특히 Boore<sup>(4)</sup> 및 관련 연구기관의 연구보고서는 표준응답 스펙트럼의 대표성 특히 고주파수 대역에서의 보수성에 대하여 문제점을 제기하였다. 또한 표준응답 스펙트럼은 주로 미국 서부 지역 중에서도 극히 한정된 지역에서 발생한 지진으로부터 관측된 강지진동을 이용하여 개발되었기 때문에 지진발생 특성이 다른 지역에 표준응답 스펙트럼을 적용할 때 지진파 전달 감쇄특성 및 부지고유 특성의 대표성에 대해 Boore and Joyner<sup>(5)</sup>는 문제점을 제기하였다. 뿐만 아니라 최대가속도값 및 최대지진규모 등에 적합한 강지진동을 선

택할 때 이용가능한 강지진동 자료에 있어서 많은 제한이 있기 때문에 지진원 특성의 대표성에 대하여 문제점을 역시 지적하고 있다.

따라서 지진발생 특성을 충분히 대표할 수 있는 임의 지역 고유의 응답스펙트럼을 개발할 필요가 있으며 이를 위한 준비 단계로서 본 연구는 국내 지진발생 특성을 대표할 수 있고 외국에서 실제 관측된 유사강지진동을 이용하였다. 또한 응답스펙트럼을 효과적으로 분석하기 위해 본 연구의 분석결과를 표준응답 스펙트럼과 비교하였다.

외국에서 실제 관측된 강지진동을 입력자료로서 선택할 때 강지진동 특성을 결정하는 3 가지 주요 지진지체구조 특성 요소인 지진원 특성, 진앙거리의 증가에 따라서 지진파 감쇄특성 및 site effect를 고려하였다. 이렇게 선택된 강지진동을 이용하여 가속도 및 속도응답을 각각 계산하고 이를 통계 처리하여 응답의 Amplification Factor를 분석하였다. 다음 단계로 주파수별 Amplification Factor를 구하고 이를 다시 표준 응답스펙트럼과 비교 분석하였다. 응답스펙트럼 평가를 위하여 계산된 Amplification Factor를 전체 주파수 대역을 고려하여 평활화하고 단순화하는 단계 등이 추가적으로 필요하나 본 연구는 전체 관심 주파수 대역에 대하여 Amplification Factor를 단순히 계산하여 분석하였다.

## 2. 스펙트럼 분석

### 2.1 강지진동 자료처리 및 유사강지진동 선택

본 연구는 주파수 대역에서 강지진동 자료마다 약간의 차이가 있지만 강지진동 분석을 위하여 별도로 필터링과 같은 자료처리 과정을 직접 적용하지 않고 Baseline Shift와 같은 기본적 처리와 고주파수 및 저주파수 대역의 대역 필터링 등과 같이 이미 처리된 강지진동 자료를 이용하였다. 주어진 각각의 수평 및 수직성분 강지진동에 대하여 응답 스펙트럼을 계산하기 위해 응답을 계산하는 주파수의 간격을 아주 조밀하게 설정하여 (100개의 주파수) 주파수 간격이 응답스펙트럼의 모양 특성에 주는 효과를 최소화시켜 특히 고주파수 대역에서 주파수 간격에 따른 영향을 최소화하였다. 구체적으로 0.1 Hz부터 30 Hz의 관심 주파수 구간에 대하여 100개의 주파수를 선정하고 주파수 간격은 일반적으로 타 연구에서 적용하고 있는 바와 같이 주파수에 로그를 취한 값이 등간격이 되도록 유지하여 가속도 응답을 계산하였다.

전체 관심 주파수 대역을 몇 개의 Control Point로 나누어 Amplification Factor를 각 Control Point사이의 주파수 대역마다 직선화 시키는 과정을 거치지 않고 본 연구는 계산된 수평 및 수직강지진동 응답에 대한 Amplification Factor값을 계산하였다. 또한 결과를 미국 원자력규제위원회의 표준응답 스펙트럼의 모양 특성과 상호 비교하였다. 전체 관심 주파수 대역에 걸쳐서 각각의 응답 주파수에서 평균값 및 평균값에 표준편차가 더해진 값에 해당하는 변화도를 각각 비교하고 또한 미국 원자력규제위원회의 표준응답스펙트럼의 모양 특성과 상호 비교하였다.

일반적으로 미국 서부 지역은 미국 동부 및 캐나다 북동부 지역과 지진원 특성 및 지진파 전달 감쇄특성 등에서 서로 상이하고, 이를 고려하여 본 연구에서는 미국 서부 지역보다는 상대적으로 동부 및 캐나다 북동부 지역에서 발생한 지진으로부터 관측된 강지진동 자료를 선택하였다. 또한 미국 동부 및 캐나다 북동부 지역에 적합한 응답스펙트럼을 개발하기 위한 연구가 EPRI에 의하여 추진되어 왔으며 EPRI가 발행한 연구 보고서<sup>6)</sup>가 제시한 바와 같이 한반도, 미국 동부 및 캐나다 북동부 지역 가운데 일부 지역은 지체 구조적으로 안정지각구조지역 (SCR; stable continental region) 으로 평가되어 지진지체구조적 특성을 고려할 때 미국 동부 및 캐나다 북동부 지역과 상호 유사한 지역으로 평가하였다. 따라서 본 연구는 캐나다 동북부인 쉐일드(Shield) 에서 발생한 Miramichi 지진, Nahanni 지진, Saguenay 지진 및 미국 중부에서 발생한 New Madrid 지진을 응답스펙트럼 개발을 위한 입력 자료로 이용하였다. 본 연구에서 인용된 강지진동 관측 자료는 표 1에 주어져 있다.

표 1 응답 스펙트럼 분석에 이용된 유사강지진동 자료 목록

| 지진명<br>(지진발생지역)           | 강지진동 성분<br>및 숫자 | 지진관측소<br>지반조건 |
|---------------------------|-----------------|---------------|
| Miramichi 지진<br>(캐나다 동북부) | 수평성분:9          | Bedrock       |
|                           | 수직성분:5          | Bedrock       |
| Nahanni 지진<br>(캐나다 동북부)   | 수평성분:10         | Bedrock       |
|                           | 수직성분:6          | Bedrock       |
| New Madrid 지진<br>(미국 중동부) | 수평성분:11         | Bedrock       |
|                           | 수직성분:5          | Bedrock       |
| Saguenay 지진<br>(캐나다 동북부)  | 수평성분:6          | Bedrock       |
|                           | 수직성분:3          | Bedrock       |

위 표에서 주어진 바와 같이 국내의 지진지체구조 특성을 대표 가능한 응답 스펙트럼 모양 특성을 개발

하기 위하여 수평 성분 강지진동은 36개, 수직 성분 강지진동은 19개를 이용하였다. 위 표에서 제시된 모두 55개의 강지진동은 관측소 조건을 고려하기 위하여 우선 건물 등 구조물의 영향을 전혀 받지 않는 자유장 (free field)에서 관측된 강지진동이 고려되었으며 또한 국내 주요 시설물의 부지조건 가운데 공통적으로 다수에 해당하는 부지조건을 고려하여 암반 지반 조건에서 관측된 강지진동을 평가에 이용하였다.

캐나다 동북부에서 발생한 Miramichi 지진, Nahanni 지진, Saguenay 지진 및 미국 중부에서 발생한 New Madrid 지진으로부터 관측된 강지진동의 sampling rate는 일률적으로 0.005sec 이다. 일반적으로 응답 스펙트럼 특성 분석을 위하여 관심 고주파수 대역이 약 30 Hz 부근이고 본 강지진동 자료를 분석에 이용할 경우 55개의 강지진동 자료 자체의 Nyquist Frequency는 100Hz로서 30Hz보다 대역이 훨씬 광범위하기 때문에 원리적으로 충분히 의미 있는 결과를 얻을 수 있다.

수평성분에 대한 Amplification Factor를 구하기 위해 가속도 강지진동에 대한 주파수별 응답을 계산하고 다시 이를 실제 지반가속도값을 이용하여 계산하였다. 수직 성분의 경우 강지진동에 대한 각각의 주파수에 대한 Amplification Factor를 구하기 위해 수평 두 성분 강지진동의 최대 관측값의 평균을 이용하지 않고 수직 성분 강지진동 자체의 관측 값을 그대로 이용하였다.

첫 단계로서 입력 강지진동의 지진원 특성과 같은 강지진동 자체 특성을 분석하기 위하여 각각의 강지진동을 처리하여 Fourier 스펙트럼을 분석하였고 또한 해당 phase spectrum도 분석하였다. Fourier 스펙트럼을 분석시 Nyquist Frequency 대역까지 고려하여 강지진동 자료의 aliasing을 여부를 조사하였고 이외의 주파수 대역부분은 이론적으로 대칭이기 때문에 분석을 생략하였다. 다음 단계로서 입력 강지진동을 이용하여 지반의 가속도 및 속도 응답에 대한 분석하였다. 응답을 구하기 위해 critical damping 값은 5%값에 대해서만 응답을 계산하였고 이를 상호 비교하였다. 이를 이용하여 다시 지반의 가속도 및 속도 응답에 대한 주파수별 응답의 Amplification factor값을 계산하였다.

## 2.2 분석 결과

그림 1은 수평성분 가속도 및 속도의 Amplification Factor 스펙트럼을 보여주고 있다. 가로축은 주파수 값을 나타내고 있고 세로축은 Amplification Factor를 나타내고 있다. 또한 표준응답스펙트럼 곡선과 4 개의

곡선이 주어져 있다. 최상부의 곡선은 가속도 응답의 평균값에 표준편차가 더해진 값에 해당하는 Amplification Factor 스펙트럼 곡선을 나타내고 다음 하부의 곡선은 가속도 응답의 평균값에 해당하는 Amplification Factor 스펙트럼 곡선을 나타내고 있다. 위로부터 세 번째 곡선은 속도 응답의 평균값에 표준편차가 더해진 값에 해당하는 Amplification Factor 스펙트럼 곡선을 나타내고 네 번째 곡선은 속도 응답의 평균값에 해당하는 Amplification Factor 스펙트럼을 나타내고 있다.

그림 1에서 보여주는 바와 같이 36개 수평 성분 강지진동을 처리하여 결과되는 가속도 응답에서의 주파수별 Amplification Factor는 특히 12 Hz 또는 13 Hz 이상의 주파수 대역에서 표준편차가 더해진 값에 해당하는 Amplification Factor가 표준응답스펙트럼 보다 2 배 이상 초과하고 있다. 또한 고주파수 대역으로 증가할수록 초과 정도가 증가하고 있음을 보여 주고 있다. 이러한 초과 현상은 최근의 연구 결과인 Boore and Joyner<sup>(5)</sup>가 제시한 바와 초과 시작점의 주파수 값이 정확하게 일치하지 않지만 현재 준용 중인 표준 응답 스펙트럼의 고주파수 대역에서의 보수성에 대한 문제점을 이미 지적해 온 바와 일치한다.

또한 가속도 응답의 Amplification Factor 값의 변화를 살펴보면 평균값과 표준편차가 더한 값(+1σ)에

해당하는 값에 있어서 상호간 차이가 대단히 크게 나타난다. 특히 고주파수 대역으로 주파수 값이 증가할수록 두 값의 차이는 증가하고 있다. 하지만 상대적으로 속도 응답에 대한 Amplification Factor 값의 변화를 살펴보면 평균값과 표준편차가 더한 값(+1σ)에 해당하는 값에 있어서 전체 주파수 대역에 걸쳐서 약 1 배의 값을 보여주고 있으며 커다란 차이를 보이지 않고 있다.

그림 2는 수직성분 가속도 및 속도의 Amplification Factor 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림 1과 동일하게 가로축은 주파수 값을 나타내고 있고 세로축은 Amplification Factor를 나타내고 있다. 그림 1과 마찬가지로 표준응답스펙트럼 곡선과 4 개의 곡선이 주어져 있다. 최상부의 곡선은 수직성분 가속도 응답의 평균값에 표준편차가 더해진 값에 해당하는 Amplification Factor 스펙트럼 곡선을 나타내고 다음 하부의 곡선은 수직성분 가속도 응답의 평균값에 해당하는 Amplification Factor 스펙트럼 곡선을 나타내고 있다. 위로부터 세 번째 곡선은 수직속도 응답의 평균값에 표준편차가 더해진 값에 해당하는 Amplification Factor 스펙트럼 곡선을 나타내고 네 번째 곡선은 수직 성분 속도 응답의 평균값에 해당하는 Amplification Factor 스펙트럼을 나타내고 있다.

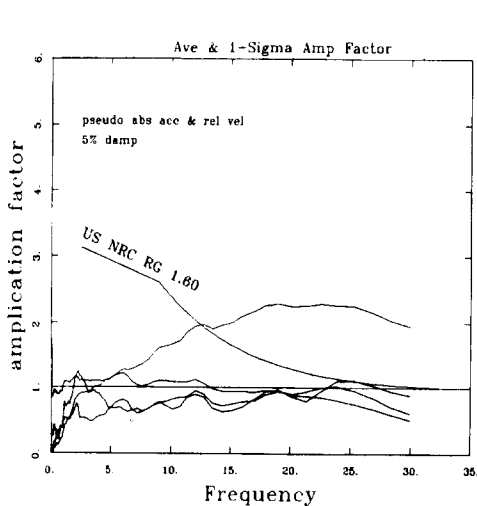


그림 1 수평성분 가속도 및 속도의 Amplification Factor 스펙트럼

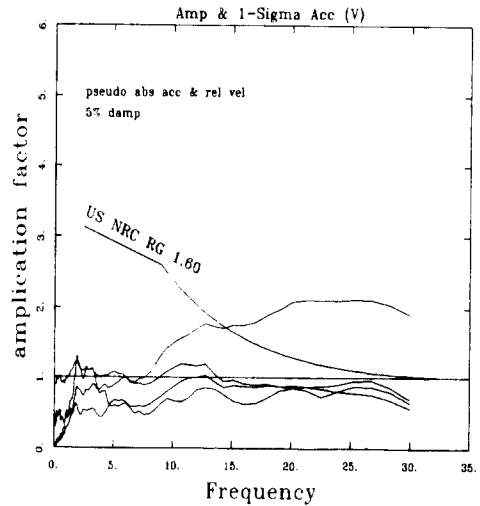


그림 2 수직성분 가속도 및 속도의 Amplification Factor 스펙트럼

그림 2에서 보여주는 바와 같이 19개 수직 성분 강지진동을 처리하여 결과되는 주파수별 가속도 응답의 Amplification Factor 값의 변화를 살펴보면 수평성분과 유사한 양상을 보여주고 있다. 구체적으로 가속도 응답에서의 주파수별 Amplification Factor는 15 Hz 이상의 주파수 대역에서 표준편차가 더해진 값에 해당하는 Amplification Factor가 표준응답스펙트럼 보다 2 배 이상 초과하고 있다. 또한 고주파수 대역으로 증가할수록 초과 정도가 증가하고 있음을 보여 주고 있다. 이러한 초과 현상은 수평성분 Amplification Factor 분석결과와 마찬가지로 최근의 연구 결과인 Boore and Joyner<sup>(5)</sup>가 제시한 바와 같이 초파 시작점의 주파수 값이 정확하게 일치하지 않는다 하더라도 현재 준용 중인 표준응답 스펙트럼의 고주파수 대역에서의 보수성에 대한 문제점을 이미 지적해 온 바와 일반적으로 일치한다.

또한 수직성분 가속도 응답의 Amplification Factor 값의 변화를 살펴보면 수평가속도 응답과 유사하게 평균값과 표준편차가 더한 값(+1σ)에 해당하는 값에 있어서 상호간 차이가 대단히 크게 나타난다. 특히 고주파수 대역으로 주파수 값이 증가할 수록 두 값의 차이는 증가하고 있다. 하지만 상대적으로 속도 응답에 대한 Amplification Factor 값의 변화를 살펴보면 평균값과 표준편차가 더한 값(+1σ)에 해당하는 값에 있어서 전체 주파수 대역에 걸쳐서 커다란 차이를 보이지 않고 지반가속도 값과 거의 비슷한 값을 보여주고 있다.

### 3. 결 론

본 연구 결과에 의하면 국내 지진지체구조 특성을 대표가능한 강지진동을 처리한 결과인 표준편차 값에 해당하는 Amplification Factor값은 미국의 서부 지역에 관측되고 암반 지반 조건에서 관측된 강지진동을 처리한 결과인 표준응답 스펙트럼 보다 고주파수 대역에서 수평 및 수직성분 모두 가속도 응답의 경우 훨씬

높은 값을 가지고 있음을 보여주고 있다.

따라서 미국의 서부 지역에 관측되고 암반 지반 조건에서 관측된 강지진동을 처리한 결과와 국내 지진 발생 특성과 유사한 미국 동부 및 캐나다 동북부에서 발생 관측된 강지진동을 처리한 본 연구 결과와는 서로 심각한 차이점은 표준응답스펙트럼의 계속적인 적용을 지양하고 국내 고유의 지진지체구조 특성을 영가 가능한 응답스펙트럼개발의 필요성을 의미한다.

### 참 고 문 헌

1. Blume, J.A., Sharpe, R.L., and Dala, J.S., "Recommendations for Shape of Earthquake Response Spectra," John A. Blume and Associates, Engineers, San Franciscans, CA, USAEC contract No. AT(49-5)-3011, 1973.
2. Mohraz, B.H., Hall, W.J., and Newmark, N.M., "A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra", N. M. Newmark, Consulting Engineering Services, Urbana III., USAEC Contract No. AT (49-5)-2667, 1972.
3. Newmark, N.M., Blume, J.A., and Kapur, K.K., "Seismic design spectra for nuclear power plants," *Journal of Power Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 99, No PO2, 1973.
4. Boore, D.M., "Estimation of Response Spectra and Peak Values : an Interim Report," USGS OP 83-83-2, 1983.
5. Boore, D.M., and Joyner, W.B., "Estimation of Response Spectra and Peak Values from North Western American Earthquakes," USGS OP 94-81-2, 1994.
6. EPRI, "The Earthquakes of Stable Continental Regions," TR-102262-V1, 1994.