

한반도 지진특성을 고려하여 모사된 강진동에 대한 가속도 응답스펙트럼

김 성 균*

진남대학교 지구환경과학부, 500-757 광주 북구 용봉동

The Acceleration Response Spectrum for Simulated Strong Motions Considering the Earthquake Characteristics of the Korean Peninsula

Sung Kyun Kim*

School of Earth and Environmental Sciences, Gwangju 500-757, Korea

Abstract: The response spectrum is one of the important basic materials for the aseismic design. Numerous strong ground motions based on the seismic source characteristics for the earthquakes occurring in the Korean Peninsula were simulated to obtain the response spectra by using the computer program, SMSIM, developed by Boore (2005). Through the extensive review of other study outcomes, the input data for the simulation such as seismic source and attenuation characteristics were selected. The spectra obtained from the simulated ground motions were normalized to 1.0 g of zero period acceleration and compared with the standard response spectrum proposed by the U.S. Atomic Energy Commission (AEC, 1973). In this study, we found that the spectral values for the response spectra appeared to be larger than those of the standard spectrum in the frequency band above roughly 10 Hz. The variation of resulting response spectra was evaluated with the variable stress drops. It was shown that the spectral amplitude of the spectrum for the larger stress drop denotes higher value in the low frequency range.

Keywords: response spectrum, simulated strong motion, Korean Peninsula, seismic source characteristics

요 약: 응답스펙트럼은 내진설계에 있어서 중요한 기초자료의 하나이다. 응답스펙트럼을 얻기 위하여, 한반도에서 발생하는 지진들의 지진원 특성에 근거하여 다수의 강진동을 Boore(2005)에 의해 개발된 컴퓨터 프로그램 SMSIM을 사용하여 모사하였다. 여러 연구결과들에 대한 충분한 검토를 통하여, 모사에 필요한 입력자료들을 선정하였다. 모사된 강진동으로부터 얻은 응답스펙트럼은 가속도 1.0 g에 대하여 정규화하여 미국 원자력위원회(1973)의 표준응답스펙트럼과 비교하였다. 이 연구에서 얻어진 응답스펙트럼의 스펙트럼 진폭은 대략 10 Hz 이상의 고주파 대역에서 표준 응답스펙트럼 값에 비하여 큰 것으로 나타났다. 또한 응력강하량의 변화에 따른 응답스펙트럼의 변화를 평가하였다. 그 결과 큰 응력강하량에 대한 응답스펙트럼의 스펙트럼 진폭은 저주파 범위내에서 큰 값을 나타냄을 제시하였다.

주요어: 응답스펙트럼, 모사 강진동, 한반도, 지진원 특성

서 론

한반도는 판 경계에 위치한 서남일본에 비하여 지진활동이 상대적으로 활발하지는 않다. 한반도는 잘 알려진 바와 같이 북동중국과 같이 판 내부에 속하

며, 발생지진도 판 내부지진의 특성을 갖고 있다. 일반적으로 판 내부지진은 판 경계지진에 비하여 지진의 시공간 분포가 불규칙적이므로, 예측이 쉽지 않으며 지진발생 빈도가 적고 우발적이라 할 수 있다. 따라서 이와 같은 판내부 지진의 특성 때문에 지진에 대한 대비가 소홀하기 쉽다.

한편, 현대사회는 지진과 같은 자연재해에 대하여 대단히 취약하다 할 수 있다. 인구의 도시집중, 산업시설의 밀집 등은 지진과 같은 재해가 발생했을 때

*Corresponding author: kimsk@jnu.ac.kr

Tel: 82-62-530-3454

Fax: 82-62-530-3459

재해의 증폭이 쉽고 장기적으로 그 파급효과가 크게 나타나게 되어, 오랜 기간 동안 국가경제에 큰 타격을 줄 수 있기 때문이다.

위에서 지적한 바와 같이 피해지진의 발생 가능성과 재해의 증폭 및 파급효과를 생각할 때 지진에 대한 사전 대비가 필요함은 자명하다. 지진발생 그 자체를 인공적으로 억제할 수는 없으며, 어떤 지역내에서 발생가능한 지진을 단기적으로 미리 예측한다는 것도 현재로서는 불가능하다. 따라서 지진에 의한 피해를 경감시키기 위해서는 이에 대한 대책수립이 필요하며, 이러한 대책의 일환으로서 구조물에 대한 내진설계가 널리 활용되고 있다.

국내에서 1988년에 만들어진 초기의 내진설계 기준안에서는 6층 이상의 일반건물과 연건평 300평 이상의 건물에 내진설계를 적용하도록 규정하였다. 한국지진공학회(1997)는 건설교통부의 의뢰로 수행한 내진설계 기준연구에서 기준이 되는 지역진도값을 수정하였으며, 중요도가 높은 구조물에는 동적인 내진설계를 적용하도록 추천하였다. 최근에 이르러 2006년 4월부터는 3층이상의 건물과 연건평 300평 이상의 건물에 내진설계가 의무화 되었다. 한편 인공 구조물에 대해서는 내진설계의 적용시기가 각각 다르나, 원자력발전소의 경우는 건설 초기부터 비교적 엄격한 동적인 내진설계가 적용되었다. 동적인 내진설계를 위해서는 지진 응답스펙트럼(response spectrum)이 필요하며, 응답스펙트럼은 지진동과 같은 동적 하중을 받는 단일 자유도계(single-degree-of-freedom system)의 최대응답을 주기 또는 주파수에 대하여 나타낸 것으로 지진동의 특성에 따라 달라진다.

일반적으로 어떤 지역에서 관측되는 지진동은 진원에서의 특성, 즉 지진원 특성에 전파과정중의 감쇠효과와 부지에서의 증폭효과 등이 복합적으로 작용한 결과이므로 지역적으로 다른 특성을 갖게 된다. 예를 들면, 지체구조적 환경이 다른 미국의 동부와 서부의 지진동 특성은 다르며, 따라서 응답스펙트럼도 서로 다른 것으로 알려져 있다. 한국지진공학회(1997)가 추천한 응답스펙트럼은 우리나라의 지체구조적 특성이 충분히 고려되지 않은 것이며, 또한 국내 원자력발전소의 내진설계에는 미국원자력위원회의 표준응답스펙트럼(U.S. AEC, 1973)을 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake)값으로 비례조정(scaling)하여 사용하고 있다. 미국 원자력위원회의 표준응답스펙트럼은 주로 미국서부 지역에서 발생한 강진기록을 이용하여 작성

된 것으로서 국내의 지진과 지질학적 특성에 맞는지는 의문이다. 이러한 관점에서 한반도에 적절한 응답스펙트럼의 개발은 국내 원자력발전소를 비롯한 주요 산업시설물의 내진성능 확보라는 점에서 선결과제라 할 수 있다.

잘 알려진 바와 같이, 한반도는 인접한 북동 중국이나 서남일본에 비하여 지진활동이 활발하지 않은 편이며, 큰 규모 지진의 발생빈도도 낮다. 기상청 지진센터(2007)에 의하면, 1978년부터 2006년까지 29년간에 관측된 규모 3.0 이상의 지진 수는 총 264회로서 연평균 9회에 해당하며, 규모 5이상의 지진은 5회에 불과하다. 더구나 국내에서 디지털 지진관측이 시작된 것은 1996년부터이며, 전국적인 관측망은 2000년 이후에 완성되었다. 결국 이용 가능한 지진자료, 특히 큰 규모의 지진자료는 극히 제한적이다. 따라서 한반도의 지체구조적 특성에 맞는 응답스펙트럼은 관측된 지진자료를 직접 입력하여 얻을 수는 없으며, 현재로서는 모사 또는 합성된 지진동(simulated or synthetic ground motion)을 이용하여 얻을 수 밖에 없다. 이 연구의 목적은 한반도에서 발생하는 지진의 지진원의 특성을 추출하여, 이 특성에 맞는 응답스펙트럼을 작성하여 현재 국내 원전에 사용중인 응답스펙트럼을 평가하는 것이다.

Cho(1999)는 Boore(1983)의 방법에 근거한 강진동을 모사하여 강진동의 거리에 따른 감쇠식을 제안하였다. 박동희 외(2000)는 한반도 남동부에서 모사 강진동으로부터 얻은 감쇠식을 실제의 지진파 감쇠와 비교 하였으며, 조남대와 박창업(2001; 2003)은 부지효과까지를 고려한 강진동 모사를 시도하였다. 강진동 모사와 관련된 이러한 연구들은 거리에 따른 지진파 감쇠식을 얻기 위한 목적으로 수행된 것이며, 응답스펙트럼 개발을 위한 것이 아니다. 강진동 모사에는 입력상수로서 그 지역의 지진특성을 나타내는 지진원상수 들이 필요하다. 그러나 이 연구들에서는 한반도 발생지진의 지진원 특성에 대한 분석이 충분치 않았다고 할 수 있다.

이와는 별개로 김성균과 김준경(2003) 및 Cho and Joe(2005)는 국내에서 발생한 지진들의 가속도기록을 이용하여 직접적으로 구한 응답스펙트럼을 미국 원자력위원회가 제안한 표준응답스펙트럼(U.S. AEC, 1973)과 비교하였다. 그 결과 대략 10 Hz를 경계로 고주파 부분에서는 국내지진기록으로부터 구한 응답이 크고, 저주파 부분에서는 표준응답이 큰 것으로 나타났

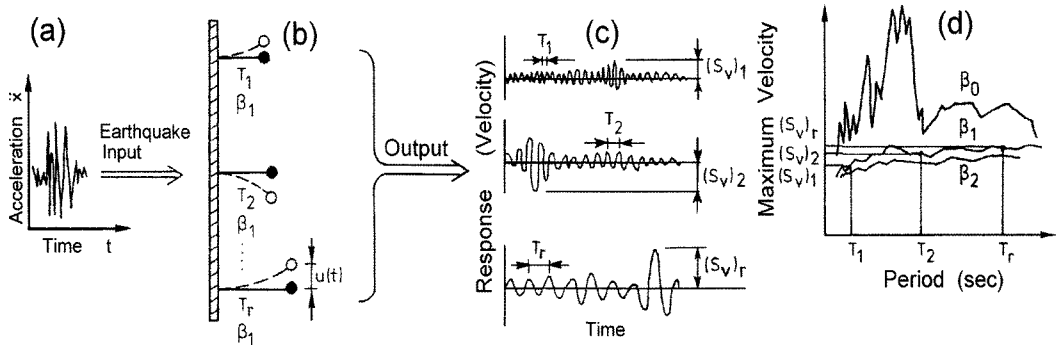


Fig. 1. Schematic diagram to explain the response spectrum (Redrawn from Solnes, 1974). (a) Earthquake input motion, (b) single-degree-of-freedom system, (c) velocity response for various periods, and d) response spectrum for the damping coefficients of β_0 , β_1 , and β_2 .

다. 그러나 입력지진동으로 사용한 지진들의 규모가 작기 때문에 나타나는 당연한 결과로 받아들일 수 있다. 결국 김성균과 김준경(2003)은 국내 지진기록을 직접 사용하기 보다는 국내 지진의 지진원 특성에 맞는 모사 강진동으로부터 응답스펙트럼을 작성할 것을 제안하였다.

위에서 검토한 바와 같이 응답스펙트럼과 관련하여 국내에서 수행된 연구는 극히 제한적이며, 국내 지진의 지진원 특성이 충분히 고려되었다고 할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 한반도에서 발생하는 지진의 지진원 특성에 맞는 강진동을 모사하여, 이 강진동으로부터 작성된 응답스펙트럼과 현재 국내에서 사용중인 응답스펙트럼과의 비교를 통하여 현재 사용중인 응답스펙트럼을 평가하게 된다.

응답스펙트럼

응답스펙트럼을 개념적으로 쉽게 설명하기 위한 Fig. 1의 (b)에서 주기가 각각 T_1 , T_2 , T_r 이고, 감쇠계수가 β_1 인 탄성 단자유도계(single-degree-of-freedom system)에 (a)와 같은 강지진동이 입력되었을 때, 각각의 진동계는 서로 다른 진동을 하게 된다. 이러한 입력 지진동에 대하여 출력으로 나타나는 응답을 변위, 속도, 가속도의 시계열로 나타낼 수 있으며(Fig. 1의 (c)), 그림에서는 속도 응답을 보여 주고 있다. 주기 T_1 , T_2 , T_r 인 진동계의 속도응답에 대응하는 최대값을 각각 $(S_v)_1$, $(S_v)_2$, $(S_v)_r$ 이라 할 때, 이 값들을 주기를 가로축으로 하는 좌표평면의 세로축에 나타낸 것이 바로 응답 스펙트럼(Fig. 1의 (d))이다. 응

답스펙트럼은 속도응답은 물론 변위 및 가속도 응답을 지칭하며, 감쇠계수가 그림에서와 같이 β_0 , β_1 , β_2 인 진동계에 대해서도 고려할 수 있다.

응답스펙트럼의 계산방법에 대해서는 Solnes(1974)에 잘 서술되어 있어, 여기서는 그의 설명을 요약하여 제시한다. Fig. 1의 (b)에서와 같은 단자유도계의 운동방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$m[\ddot{y}(t) + \ddot{x}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t)] = 0 \quad (1)$$

여기서 m 은 질량, k 는 스프링 상수, c 는 감쇠계수를 나타내며, $y(t)$ 는 입력 지진동 $\ddot{x}(t)$ 에 대응하는 변위를 나타낸다. 이 식은 감쇠가 있는 진동계의 원진동수를 $\omega_0 = \sqrt{k/m} = 2\pi/T_0$, 감쇠계수 $b = c/2\sqrt{km}$ 라 할 때,

$$\ddot{y}(t) + 2\beta\omega_0\dot{y}(t) + \omega_0^2y(t) = -\ddot{x}(t) \quad (2)$$

이 된다. 이 식의 해는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$y(t) = -\frac{T_0}{2\pi} \int_0^t \ddot{x}(\tau) \exp\left[-\beta\frac{2\pi}{T_0}(t-\tau)\right] \sin\frac{2\pi}{T_0}(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

식 (3)의 중첩적분을 실행하면, 구조물의 시간축상에서의 변위 $y(t)$ 를 구할 수 있으며 이를 진동계의 변위응답이라 부른다. 일반적으로 비감쇠 진동에서는 변위, 속도 및 가속도사이에는 감쇠가 없는 진동계의 고유주기를 T 라 할 때

$$\dot{y}(t) = \frac{2\pi}{T}y(t), \quad \ddot{y}(t) = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2y(t) \quad (4)$$

의 관계가 성립된다(Oohara, 1979). 따라서 진동계의 감쇠계수가 너무 크지 않은 범위에서는 $T \approx T_0$ 가 성립되므로 식 (3)으로부터 다음의 근사식을 얻을 수 있다.

$$\dot{y}(t) = \int_0^t \ddot{x}(t) \exp\left[\beta \frac{2\pi}{T}(\tau-t)\right] \cos \frac{2\pi}{T}(\tau-t) d\tau \quad (5)$$

$$\ddot{y}(t) + \ddot{x}(t) = \int_0^t \ddot{x}(t) \exp\left[\beta \frac{2\pi}{T}(\tau-t)\right] \sin \frac{2\pi}{T}(\tau-t) d\tau \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 각각 속도 및 가속도 응답이라 한다. 식 (3), (5)와 (6)의 우변을 적분했을 때, 그 값이 최대가 될 때의 응답을 각각 y_{\max} , \dot{y}_{\max} ($=S_v$), $(\ddot{y} + \ddot{x})_{\max}$ 라 하면, 이들 사이에는 $y_{\max} \approx \frac{T}{2\pi} S_v$, $(\ddot{y} + \ddot{x})_{\max} \approx \frac{T}{2\pi} S_v$ 가 근사적으로 성립한다. 이와 같이 정의된 최대응답은 구조물의 고유주기와 감쇠계수의 함수이며, 공학적으로 중요하다. 이와 같이 주기 또는 주파수를 가로축으로 하여 세로축에 변위, 속도 및 가속도에 대한 최대응답을 나타낸 것을 응답스펙트럼이라 하며, 동적인 내진설계에 기초자료가 된다.

한반도 발생지진의 지진원 특성

서론에서 언급한 바와 같이, 한반도는 인접한 북동중국이나 서남일본에 비하여 지진활동이 활발하지 않은 편이며, 큰 규모 지진의 발생빈도도 낮아 이용 가능한 지진자료, 특히 큰 규모의 지진자료는 극히 제한적이다. 따라서 한반도의 지체구조적 특성에 맞는 응답스펙트럼은 관측된 지진자료로부터 얻을 수는 없으며, 모사 또는 합성된 지진동을 이용하여 얻을 방법 외에 없다. 모사된 지진동은 한반도에서 발생하는 지진의 지진원 특성에 맞지 않으면 안 된다.

지진원의 특성을 규정하는 지진원 상수들 사이의 이론적인 관계는 단층면의 변위와 지구물질의 물성을 적절히 모델화함으로써 유도할 수 있으며, 이러한 이론적인 관계가 실제 지진에 대하여 얻은 경험적인 관계와 크게 다르지 않다는 것이 알려져 있다(Lay and Wallace, 1995). 예를 들면 Kanamori and Anderson (1975)은 표면파 규모 6 이상의 지진에 대하여 지진모멘트(M_0)와 단층면의 면적(S) 사이의 경험적인 관계를 조사하여, $\log M_0$ 와 $\log S$ 사이에 뚜렷한 선형적인 관계가 있음을 밝혔다. 이 사실은 응

력강하량이 지진모멘트와 관계없이 일정한 값을 가짐을 의미한다(Lay and Wallace, 1995). 실제로 Kanamori and Anderson(1975)은 판 경계면 지진의 응력강하량으로서 30 bar, 판내부 지진의 값으로서 100 bar를 얻었다. 그러나 그 후 여러 연구(Fletcher, 1980; Haar et al., 1984)에서 어떤 한계이하의 지진모멘트에서는 응력강하량이 일정하지 않다는 결과와 그 반대의 연구결과(Boatright, 1984; Hough, 1996)가 대두되었다.

여기서는 강진동 모사에 있어서의 주요 입력변수인 지진원 상수에 관한 국내의 연구결과를 검토하기로 한다. 한반도와 그 주변에서 발생한 지진을 대상으로 지진원 상수를 결정한 여러 연구들(Jun, 1990; Kim and Kim, 1998; Cho, 1999; 박동희 외, 2000)에서는 응력강하량이 10-100 bar 범위의 다양한 값이 얻어졌다. 이와 같이 다양한 연구결과들이 얻어진 것은 디지털 지진자료가 제공되기 이전의 지진자료를 사용한 연구(Jun, 1990)에도 원인이 있지만, 지진원상수를 구하는데 있어서의 방법론의 차이와 소수의 지진자료를 이용하여 결과를 얻은 점에도 그 이유가 있다. 김성균과 김병철(2002)은 한반도 및 그 주변에서 발생한 지진 49개에 대하여 지진원 상수들을 결정하여 그들 사이의 관계를 조사하였다. 모서리 주파수와 지진모멘트는 세가지의 다른 방법으로 결정하였다. 즉 모든 지진에 대하여 지진원에서의 변위 스펙트럼을 Brune (1970)의 ω^2 모델에 적합시키는 방법과 Snook(1987)의 방법을 적용하였으며, 2개의 지진에 대하여 경험적인 Green 함수법을 적용하였다. 그 결과를 종합한 것이 Fig. 2이며, 여기서는 모멘트규모(M_w), 모서리주파수(f_c), 응력강하량과 지진원 반경사이의 종합적인 관계가 도시되어 있다. 그림에서 대략 지진규모 3.6(지진모멘트가 3.0×10^{21} dyne-cm에 대응)을 경계로 하여, 그 이상에서는 응력강하량이 평균 100 bar 정도의 일정한 값을 보이며, 그 이하에서는 직선적으로 감소하는 경향을 보인다. 또한 지진규모 M_L 과 모서리 주파수 f_c 사이의 경험적인 관계로서

$$\log f_c = -0.699 M_L + 0.4075 \quad (7)$$

가 얻어 졌다. 김성균과 김병철(2002)의 연구는 다수의 지진자료를 대상으로 하고 있고, 또한 여러 방법론을 검토하여 결론을 도출하였다. 따라서 이 연구에서는 김성균과 김병철(2002)의 결과를 이용하여 강진동을 모사하게 된다.

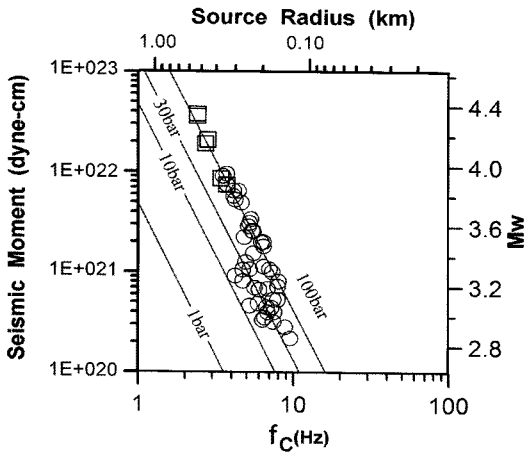


Fig. 2. Relations among corner frequency (f_c), moment magnitude (M_w), seismic moment, and source radius (after Kim and Kim, 2002).

응답스펙트럼 계산결과 및 토론

어떤 지역에서 발생 가능한 지진재해에 대비하여 동적인 내진설계를 하기 위해서는 응답스펙트럼이 필요하며, 응답스펙트럼을 작성하기 위해서는 강진동에 대한 가속도 기록이 필요하다. 강진에 대한 관측기록이 적은 경우, 모사 강진동 기록을 사용할 수 있다. 강진동을 모사하기 위한 시도는 여러 방법으로 이루어져 왔다. 단층모델을 지진원으로 설정하여 강진동을 모사하는 결정론적 방법은 초기에 지진원 및 전파매질을 지나치게 단순화한 까닭에 고주파 영역에서 실제와 차이가 있고 공학적으로 활용도가 낮은 결과를 얻을 수 밖에 없었다(Irikura, 1994). 한편 설계에 이용할 목적으로 공학자들은 완전히 통계학적인 방법으로 강진기록을 얻는 방법을 사용하여 왔다. 그러나 이 방법에는 강진동의 지속시간, 주파수 특성 및 스펙트럼 진폭등의 입력자료를 필요로 하며, 이 자료들은 결국 지진 관측자료로부터 경험적으로 결정되기 때문에 강진에 대한 자료가 적은 지역에서는 사용이 어렵다(Boore, 1987). 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 지진원과 지진파 전달특성을 모델화하여 지진동을 모사하는 혼합형 방법이 개발되었다. 이 방법은 지진원의 크기에 따라 지진동 지속시간과 평균적인 스펙트럼 성분을 결정하며, 이에 맞도록 백색잡음의 스펙트럼에 적절한 필터를 통과시켜 얻은 스펙트럼으로부터 강진동을 얻게 된다. 이러한 방법을 사용한 대표적인 예로서 Boore(1983)의 연구를 들 수 있

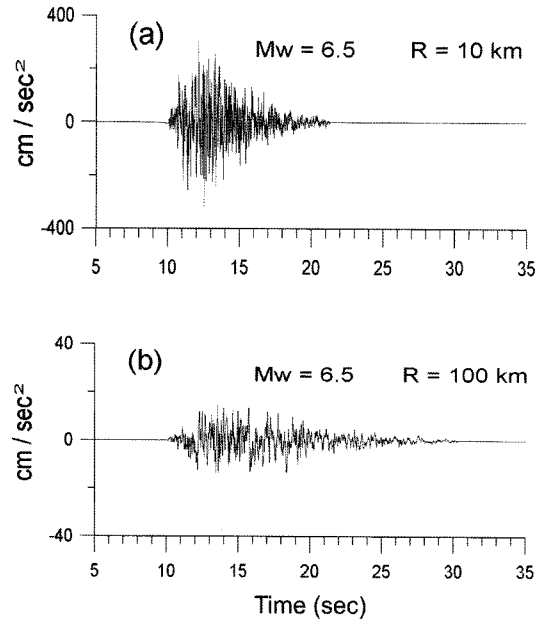


Fig. 3. Simulated ground motions of which moment magnitude is 6.5. The upper and lower seismograms denote seismograms for epicentral distance of 10 and 100 km, respectively.

며, 이 연구에서는 이 방법론에 따라 작성된 컴퓨터 프로그램 SMSIM(Boore, 2005)을 이용하여 강진동을 모사하게 된다.

이 연구에서 강진동 모사에 사용한 컴퓨터프로그램의 주요입력 자료는 스펙트럼 형태, 감쇠특성, 지진동 지속시간, 응력강하량 등이 있다. 스펙트럼 형태와 관련하여, 이 연구에서는 Brune(1970)의 점진원에 의한 원지장에서의 스펙트럼(1개의 모서리주파수 모델)을 선택하였으며, 가속도 스펙트럼 감쇠계수 κ 는 조남대 와 박창업(2003)의 값을 채용하였다. 지진파 감쇠와 관련된 상수들은 김성균 외(2002)를 참조하였다. 즉 기하학적 확장계수는 50 km를 경계로 그 이하에서는 1.0, 50 km 밖에서는 0.5로 하였으며, 감쇠식은 주파수 f 의 함수로서 $Q = 383.3f^{0.406}$ 을 입력하였다. 한편 지진동 지속시간 T 는 조남대와 박창업(2003)과 같이 모서리주파수 f_c 와 진앙거리 R 의 함수로서, $T = 1/f_c + 0.05R$ 을 사용하였다. 여기서 모서리주파수는 김성균과 김병철(2002)에서 얻어진 식 (7)에 의하여 주어진다. 입력자료중 가장 중요한 응력강하량은 한반도 발생지진에 대하여 현재까지 값이 다양하기 때문에 50 bar, 100 bar, 200 bar에 대하여 계산하여 서로 비교하였다.

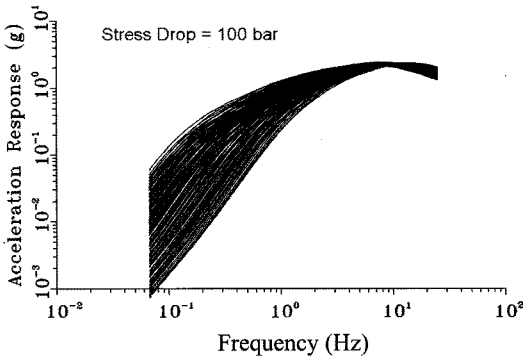


Fig. 4. The response spectra calculated from 110 simulated seismograms.

위에서 설명한 바와 같은 기본자료를 입력하여, 강진동을 모사하고, 그에 대한 응답스펙트럼을 출력하였다. Fig. 3에 응력강하량 100 bar, 모멘트 규모 6.5의 지진이 10, 100 km 떨어진 곳에서 관측된 경우를 상정하여 모사된 강진동의 가속도 기록파형을 제시하였다. 그림에서 진앙거리가 먼 100 km의 경우(그림에서 (b)), 최대진폭이 1/10 이하로 감소하고 고주파 성분이 감쇠가 커서 저주파가 탁월한 것을 알 수 있다.

통상 어떤 지역에서 내진설계에 이용하기 위한 응답스펙트럼은 다수의 강진동을 이용하여 작성하게 된다. 왜냐하면, 특정의 지역내에서 발생가능한 지진은 다양하기 때문이다. 따라서 이 연구에서는 모멘트 규모(Mw)를 5.0에서부터 7.5까지 0.25 간격으로 규모를 상정하여, 각각의 지진이 진앙거리 10-100 km의 범위내에서 기록된 것으로 가정하였다. 진앙거리는 10 km에서 100 km까지를 대수적으로 10등분 하였으며, 각각의 거리는 R=10.0, 12.9, 16.7, 21.5, 27.8, 35.9, 46.4, 60.0, 77.4, 100.0 km이다. 그러므로 강진 기록의 수는 총 110개가 되며, 이 강진에 대한 응답스펙트럼을 구하여 1.0 g(= 980 cm/sec²)로 비례조정하였다. 응답스펙트럼의 계산은 0.067-25 Hz 구간을 대수적으로 90등분한 91개의 주파수에 대하여 수행되었으며, 감쇠계수는 0.05로 고정하였다. Fig. 4에 이와 같은 방법으로 응력강하량 100 bar를 가정하여 얻은 가속도 응답스펙트럼들을 제시하였다. 그림에서 가속도 응답은 저주파에서 작고 고주파로 갈수록 커진다. 응답의 분산은 저주파에서 크고 고주파로 갈수록 작아지는데, 이것은 저주파가 고주파에 비해 상대적으로 지진규모와 진앙거리에 더욱 민감하기 때문이다.

Fig. 4에 나타낸 110개의 응답에 대한 대수평균,

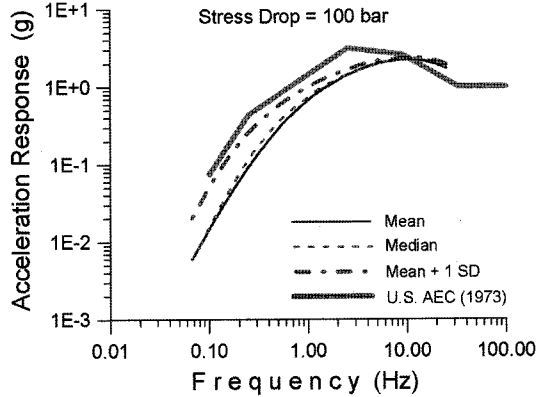


Fig. 5. The spectra for the logarithmic mean, median, and mean plus one standard deviation overlapped on the standard response spectrum proposed by U.S. AEC (1973).

중앙값 및 대수평균에 1표준편차를 더한 응답을 Fig. 5에 나타내었으며, 여기에 미국 원자력위원회가 제안한 표준응답스펙트럼(U.S. AEC, 1973)을 겹쳐서 도시하였다. 그림에서 대수평균과 중앙값은 대체로 일치한다. 강진동 모사를 통해 얻은 응답이 대략 10 Hz 이하의 저주파에서는 표준응답보다 낮은 수준에 있으나, 10 Hz 이상의 고주파에서는 표준응답보다 큰값을 보여 준다. 이러한 결과는 실제의 지진기록을 이용한 연구(김성균과 김준경, 2003; Cho and Joe, 2005)에서도 지적되었다. Kim et al.(2006)은 코다파 정규화법에 의하여 한반도 남부에서 지진과 감쇠에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과에 의하면 한반도에서 S파의 감쇠는 저주파 대역에서 일본 및 미국 서부지역과 같이 지진활동이 활발하고 감쇠가 빠른 지역과 안정대륙에 속하고 감쇠가 느린 북미대륙 북동부 지역과의 중간정도이나 고주파로 갈수록 감쇠가 느려진다는 사실을 지적하였다. 이와 같이 한반도에서 고주파성분의 감쇠가 상대적으로 느리기 때문에 고주파 대역에서의 응답이 표준 응답스펙트럼의 값보다 커지는 것으로 해석할 수 있다.

한편 응력강하량의 변화에 따른 응답스펙트럼의 변화를 고찰하기 위하여, 응력강하량 50, 100 및 200 bar를 가정하여 위에서와 마찬가지로 110개의 응답스펙트럼을 각각 구하여 그들의 대수평균을 비교하였다 (Fig. 6). 주파수에 대한 가속도 응답의 크기는 저주파에서 응력강하량이 클수록 큰값을 보여주나, 고주파로 갈수록 그 차는 줄어서 수 Hz 이상에서는 거의 무시할 정도가 됨을 알 수 있다.

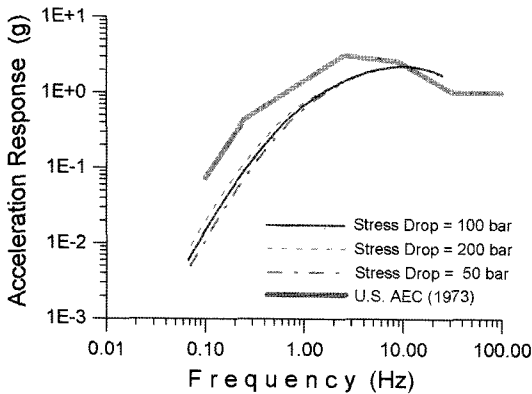


Fig. 6. The spectra calculated from seismograms of which stress drops are 50, 100, and 200 bar. The standard response spectrum proposed by U.S. AEC (1973) is also shown.

한국지진공학회(1997)에서는 설계지반운동의 특성을 기본적으로 응답스펙트럼으로 표현하였다. 그러나 당시에 국내 고유의 지진지체 구조와 지진발생 특성에 근거한 응답스펙트럼에 관한 연구가 불충분한 관계로 미국 UBC(Uniform Building Code)에 제시되어 있는 스펙트럼(Paz, 1991)을 설계응답 스펙트럼으로 채택하였다. 따라서 이 연구에서 얻어진 응답스펙트럼은 국내 내진설계 기준안 개선에 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

결론

한반도에서 발생한 지진으로부터 결정한 지진원 특성에 맞추어 다수의 강진동이 Boore(2005)의 컴퓨터 프로그램을 이용하여 모사되었으며, 모사된 강진동으로부터 얻은 평균적인 응답스펙트럼과 미국원자력위원회가 제안한 표준응답스펙트럼(U.S. AEC, 1973)을 서로 비교하였다. 그 결과, 대략 10 Hz 이하의 저주파에서는 표준응답스펙트럼의 값이 크고, 10 Hz 이상의 고주파에서는 모사된 강진동의 응답이 큰 것으로 나타났다. 또한 응력강하량의 변화에 따라 응답스펙트럼이 어떻게 변화하는가를 조사하기 위하여, 응력강하량 50, 100, 200 bar에 대하여 구한 가속도응답은 저주파에서 응력강하량이 클수록 응답이 커지는 것으로 나타났다. 이 연구에서 얻어진 응답스펙트럼은 국내 내진설계 기준안 개선에 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

사사

이 연구는 학술진흥재단의 2004년도 선도연구자지원사업(과제번호 C00396)의 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 학술진흥재단의 연구비 지원에 감사드린다. 이 논문의 심사를 맡아 유익한 조언을 통해 논문의 질을 높여 주신 한국고원대학교 경제학 교수, 강원대학교 오석훈 교수, 한국지질자원연구원 선창국 박사에게 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

김성균, 김병철, 2002, 한반도 발생지진의 지진원 상수. 한국지진공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, 6, 3-12.
 김성균, 김수경, 지현철, 2002, 한반도 남부에서의 주파수별 가속도 최대진폭의 감소. 지질학회지, 38(2), 237-250.
 김성균, 김준경, 2003, 국내지진의 응답스펙트럼 특성분석. 한국원자력안전기술원, KINS/HR-560, 118 p.
 박동희, 이정모, 김성균, 2000, 한반도 동남부의 지진파 감소와 지진원 요소. 한국지진공학회 논문집, 4(3), 99-106.
 조남대, 박창업, 2001, 추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강지진동 연구. 한국지진공학회 논문집, 5(4), 17-28.
 조남대, 박창업, 2003, 한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감소상수 추정 및 강지진동의 추계학적 모사. 한국지진공학회 논문집, 7(6), 59-70.
 한국지진공학회, 1997, 내진설계 기준연구(II). 건설교통부, 312 p.
 Boatwright, J., 1984, Comments on "Energy radiation from a spherically symmetric homogeneous source" by J. W. Rudnicki. Bulletin of Seismological Society of America, 74, 1483-1486.
 Boore, D.M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. Bulletin Seismological Society of America, 73, 1865-1894.
 Boore, D.M., 1987, The prediction of strong ground motion, In the strong ground motion seismology edited by Erdic, M.O. and Tokss, M.N., 109-141.
 Boore, D.M., 2005, SMSIM - Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.3 - A Revision of OFR 96-80-A. U.S. Geological Survey, 55 p.
 Brune, J.N., 1970 Tectonic stress and the spectra of seismic shear wave from earthquake. Journal of Geophysical Research, 75, 4997-5009.
 Cho, N.D., 1999, Stochastic prediction of strong ground motions in southern Korea. M.S. Thesis, Seoul National

- University, Seoul, Korea, 129 p.
- Cho, S.G and Joe, Y.H., 2005, Seismic fragility analyses of nuclear power plant structures based on the recorded earthquake data in Korea. *Nuclear Engineering and Design*, 235, 1867-1874.
- Fletcher, J.B., 1980, Spectra from high dynamic range digital recordings at Oroville, California aftershock and their source parameters. *Bulletin of Seismological Society of America*, 76, 43-64.
- Harr, L.C., Fletcher, J.B., and Mueller, C.S., 1984, The 1982 Enola, Arkansas, swarm and scaling of ground motion in the eastern United States. *Bulletin of Seismological Society of America*, 74, 2463-2482.
- Hough, S.E., 1996, Observational constrains on earthquake source scaling: understanding the limits in resolution. *Tectonophysics*, 261, 83-95.
- Irikura, K., 1994, Earthquake source modeling for strong motion prediction. *Zishin*, 46, 495-512 (in Japanese).
- Jun, M.S., 1990, Source parameters of shallow intraplate earthquakes in and around the Korean Peninsula and their tectonic implication. Ph.D. thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden.
- Kanamori, H., and Anderson, D.L., 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of Seismological Society of America*, 65, 1073-1095.
- Kim, S.K. and Kim, M.S., 1998, Source parameters of the southern Yellow Sea Earthquake occurred on July, 25, 1994. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2, 113-118.
- Kim, S.K., Yang, J.Y., and Oh, J., 2006, Q-values for P and S waves in the southern Korean Peninsula based on the coda-normalization method. *Geosciences Journal*, 10, 645-477.
- Lay, T. and Wallace, T.C., 1995, *Modern global seismology*. Academic Press, New York, USA, 521 p.
- Oohara, S., 1979, *Modern aseismic engineering*, Morikita-Suppan. Tokyo, Japan, 206 p.
- Paz, M., 1991, *International handbook of earthquake engineering code, programs, and examples*. Chapman & Halls, New York, USA, 545 p.
- Snoke, J.A., 1987, Stable determination of (Brune) stress drops. *Bulletin of Seismological Society of America*, 77, 2, 530-534.
- Solnes, J., 1974, *Engineering seismology and earthquake engineering*, International Publishing Company. Netherland, 315 p.
- U.S. AEC, 1973, *Regulatory Guide 1.60*. United States Atomic Energy Commission.

<http://www.kwa.go.kr/>

2007년 2월 7일 접수
2007년 3월 5일 수정원고 접수
2007년 3월 14일 채택