

오대산지진(2007/01/20) 관측자료를 이용한 응답스펙트럼 분석

김 준 경*

세명대학교 자원환경공학과, 390-711 충북 제천시 신월동 21-1

Analysis of Response Spectrum of Ground Motions from Odaesan Earthquake (2007/01/20)

Jun-Kyoung Kim*

Department of Mineral Resources and Geotechnics Eng, Semyung University,
Chungbuk 390-711, Korea

Abstract: The response spectrum was studied using the observed ground motion from the Odaesan Earthquake (2007/01/20), and then the results were compared to the seismic design response spectra (Reg Guide 1.60) applied to the domestic nuclear power plants. For the response spectrum analysis, 21 horizontal and 8 vertical observed ground motions were used for normalization and statistical analysis. The results showed that the MPOSD (Mean Plus One Sigma Standard Deviation) response spectra above 10 Hz revealed higher values than the design response spectra and those below 10 Hz revealed much lower values for both horizontal and vertical response spectra. These results suggest that the response spectra (Reg. Guide 1.60), used as seismic design code for nuclear facilities in Korea, especially above about 10 Hz, should be reexamined for application to the nuclear power plants structures operated in the Korean Peninsula.

Keywords: response spectrum, Reg. Guide 1.60, MPOSD, control point

요약: 최근 발생한 오대산지진(2007년 1월 20일)으로부터 관측된 지반진동 파형을 이용하여 응답스펙트럼을 분석하였으며, 결과를 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준과 비교하였다. 연구에 이용된 지반진동 개수는 수평성분 및 수직성분 각각 21개 및 8개이다. 지반진동을 이용하여 주파수별 지반응답을 구하고 정규화 분석 및 통계적 분석을 하였다. 본 연구결과를 국내 원자력시설물의 내진기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60과 비교한 결과 특히 약 10 Hz 이상의 고주파수 영역에서 수직 및 수평 성분 모두 MPOSD 스펙트럼이 Reg. Guide 1.60 보다 높은 값을 보여 주었다. 따라서 향후 국내 지진활동 실정에 적합한 내진설계를 위해 수직 및 수평 성분 모두 10Hz 이상의 고주파수 대역에서 응답스펙트럼 값을 심각하게 고려할 필요가 있다.

주요어: 응답스펙트럼, Reg. Guide 1.60, MPOSD, 제어점

서론

일반적으로 특정 지역에서 지진이 발생하여 관측된 지반진동을 처리하여 응답스펙트럼을 분석하고 이를 이용하여 특정 지역에 적합한 내진설계를 하고 있다. 따라서 최근 발생한 중규모의 오대산지진으로 부터 관측된 지반진동을 이용하여 응답스펙트럼을 분석하였고 이를 국내에서 가장 엄격하게 적용하고 있는

것으로 알려진 원자력시설물에 관한 내진설계 기준과 비교하였다.

응답스펙트럼에 대한 연구는 Benioff (1934)에 의해 시작되어 Biot (1941)가 지진공학에 적용하였으며, Housner가 본격적인 연구 및 응용을 시작해 1959년에 발생한 강진의 수평성분을 이용하여 최초로 내진설계에 이용한 스펙트럼을 작성하였다. 또한 Housner (1959)는 4건의 강진에서 기록된 8개 수평성분 기록 자료를 이용하여 스펙트럼을 작성하였고, 이것이 내진설계에 이용된 최초의 스펙트럼이다. 이후 Newmark et al.(1973a, 1973b, 1973c), Boore and Joyner (1994) 등에 의하여 활발하게 응답스펙트럼에 대한

*Corresponding author: kjk-512@semyung.ac.kr
Tel: 82-43-649-1319
Fax: 82-43-649-1787

연구가 수행되어 왔다. 국내에서 수행된 연구는 주로 원자력 분야와 관련하여 수행되어 왔으며 김준경(2003, 2005), 윤종구 외(2006) 및 선창국 외(2007)이 있고 최근 국내외 지역에서 대규모 및 중규모 지진이 자주 발생하여 향후 이 분야에 대해 인식이 제고되어 많은 연구가 수행될 예정이다.

지반진동 응답스펙트럼 지배방정식

일반적으로 지반진동을 이용한 응답스펙트럼은 지진 등에 의한 동적하중을 받는 탄성 단자유도계 구조물의 최대반응을 나타낸다. 일정한 범위내의 구조물의 고유 진동수 또는 고유 주기에 대해 구조물의 상대변위, 상대속도 및 절대가속도 등 3종류의 반응을 계산하고 최대반응을 각각에 대해 구할 수 있다. 지진하중을 받는 단자유도계 구조물의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) &= 0 \\
 m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + k\dot{u}(t) &= -m\ddot{x}_b(t) \\
 \ddot{u}(t) + 2\zeta w\dot{u}(t) + w^2u(t) &= -\ddot{x}_b(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $u(t)$ 는 상대변위, w 는 고유진동수 (rad/sec), ζ 는 감쇠비, $\dot{u}(t)$ 는 상대속도, $x_b(t)$ 는 지반변위, $\ddot{u}(t)$ 는 상대가속도, $\dot{x}_b(t)$ 는 지반속도, $x(t)$ 는 절대변위, $\ddot{x}_b(t)$ 는 지반가속도, $\ddot{x}(t)$ 는 절대가속도를 각각 나타낸다.

식(1)로부터 초기조건 ($u_0 = u(0)$, $v_0 = \dot{u}(0)$)을 0으로 가정하여 상대변위와 상대속도를 계산하면 다음 식과 같이 된다.

$$u(t) = -\frac{1}{w_d} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin w_d(t-\tau) d\tau \tag{2}$$

$$\dot{u}(t) = \frac{w}{w_d} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin[w_d(t-\tau)] d\tau \tag{3}$$

여기서, $w_d = w\sqrt{1-\zeta^2}$ = 감쇠진동수(rad/sec),

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} = \text{위상각이다.}$$

응답스펙트럼은 특정한 고유진동수, 및 감쇠비에 대한 단자유도계의 시간이력 중에서 상대변위, 상대속도 및 절대가속도의 최대반응으로부터 얻어지는 값이다. 따라서 변위스펙트럼(SD)과 속도스펙트럼(SV)은 식(2)와 식(3)으로부터 다음 식(4)와 식(5)와 같이

정의된다.

$$S_D(\zeta, w) = |u(t)|_{\max} = \left| \frac{1}{w_d} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin w_d(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \tag{4}$$

$$S_V(\zeta, w) = |\dot{u}(t)|_{\max} = \left| \frac{w}{w_d} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin[w_d(t-\tau)] d\tau \right|_{\max} \tag{5}$$

마지막으로 질량체의 관성력은 상대가속도가 아니라 절대가속도와 관련되므로 가속도 스펙트럼(SA)은 식(1)에서 절대가속도를 이용하여 식(6)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 \ddot{x}(t) &= \ddot{u}(t) + \ddot{x}_b(t) \\
 &= -2\zeta w\dot{u}(t) - w^2u(t)
 \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)에서 제시된 절대가속도를 이용하여 응답스펙트럼은 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 S_A(\zeta, w) &= |\ddot{x}(t)|_{\max} \\
 &= |[-2\zeta w\dot{u}(t) - w^2u(t)]|_{\max}
 \end{aligned} \tag{7}$$

일반적으로 건축 및 토목 구조물의 감쇠율은 3%-7% 정도로서 비교적 작은 값이다. 따라서 근사적으로는 $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1$ 이고, $w_d = w\sqrt{1-\zeta^2}$ 에 의해 $w_d \approx w$ 로 보고 위상각 θ 를 무시할 경우에 얻어지는 결과는 속도 반응스펙트럼(SV)과 유사한 값이 된다. 이것을 유사 속도응답스펙트럼(PSV)이라 하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$PSV(\zeta, w) = \left| \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin w_d(t-\tau) d\tau \right|_{\max}$$

$$\begin{aligned}
 PS_D(\zeta, w) &= \left| \frac{1}{w} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin w_d(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\
 &= \frac{1}{w} PSV(\zeta, w)
 \end{aligned} \tag{8}$$

식 (6)에서 ζ 값이 작은 경우에 $2\zeta w\dot{u}(t)$ 항은 무시될 수 있으므로 유사 가속도 스펙트럼(PA)은 식(9)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 PS_A(\zeta, w) &= |\ddot{x}(t)|_{\max} \\
 &= |[-2\zeta w\dot{u}(t) - w^2u(t)]|_{\max} \\
 &= |w^2u(t)|_{\max} \\
 &= w^2 PS_D(\zeta, w) \\
 &= w PSV(\zeta, w)
 \end{aligned} \tag{9}$$

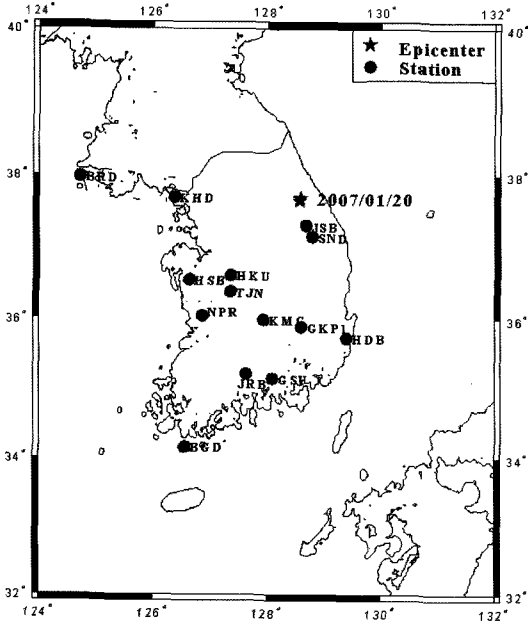


Fig. 1. Location map of epicenter and seismic stations for Odaesan earthquake (2007/01/20).

지반진동 자료

본 연구에서는 2007년 1월 20일 발생한 오대산지진으로부터 측정된 지반진동자료를 이용하였다. 오대산지역에서 발생한 오대산지진은 2004년 발생한 울진지진(규모 4.9) 이래로 최근 근래에 보기 드문 중규모 지진이다. 또한 오대산지진은 제주도 일부 지역을 제외하고는 전국에서 감지되어 관측자료가 비교적 풍부할 뿐만 아니라 한반도 내륙 중심부에서 발생하여 지진과 경로의 많은 부분이 한반도 내륙을 통과하기 때문에 한반도의 지진과 전달 특성을 대표하는 성질을 갖고 있다. 본 연구에서 사용한 지반진동의 진앙 및 관측소 위치는 Fig. 1에 제시되었으며 목록은 Table 1에 제시되어 있다. Table 1에 의하면 사용된 관측자료의 개수는 수평 및 수직 성분을 포함하여 모두 29개, 자료타입은 속도형식이며, 샘플은 1

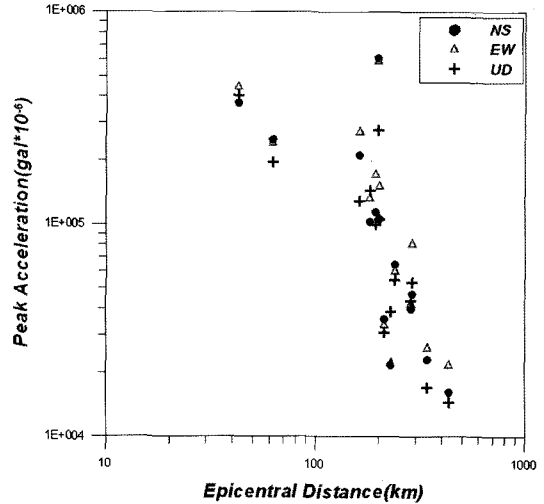


Fig. 2. Peak values vs epicentral distances for observed ground motions (UD, EW, and NS components).

초당 100개이다. 또한 Fig. 2에는 진앙거리별 지반진동의 최대값을 보여주고 있다.

본 연구에서는 2007년 1월 20일 발생한 오대산지진으로부터 측정된 지반진동자료를 이용하여 우선 푸리에 스펙트럼을 분석하였고, 분석 결과중에서 고주파영역에서의 값이 감소하지 않고 계속적으로 증가하는 현상을 보이는 10여개의 관측지반진동의 수평 및 수직성분을 모두 제외하였다. 수평성분 중에서 NS 성분은 10개 관측소, EW 성분은 11개 관측소에서 관측된 지반진동을 이용하였다. 1개 수평성분 응답스펙트럼을 계산하기 위하여 NS 및 EW 성분 모두가 존재해야 하므로 Table 1에서 제시된 TJN 지반진동을 제외하였다. 하지만 수직 성분 응답스펙트럼을 계산하기 위하여 수직성분만 필요하므로 8개 수직성분 지반진동이 모두 이용되었다. 응답스펙트럼을 계산하기 위하여 미국 국립지질조사국(USGS, 1992) 및 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 개발한 Bap Software 및 Analyst를 사용하였다.

Table 1. List of seismic stations of observed ground motion

Component	Z component	NS component	EW component
Name of Stations	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KSA, SND, TJN	BGD, GKP1, GRE, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, KSA, SND	BGD, GKPI, GRE, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, KSA, SND, TJN
Total # of stations	8	10	11

연구방법

응답스펙트럼 계산

Bap program을 이용하여 응답스펙트럼 값을 분석하였다. 각 관측소마다 응답스펙트럼값의 주파수 간격을 일정하게 유지시키기 위해 입력 지반진동의 시간길이를 조절할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 지반진동의 길이를 10.24초 이상 20.48초 미만으로 조절하여 50 Hz가 2048개의 간격이 되도록 하였다. 또한 실제 응답스펙트럼을 계산할 때 주기의 범위는 0.02초에서 10초까지 대수적으로 등간격이 되도록 주파수 간격을 조정하였다. Bap program을 이용할 경우 지반진동을 입력하기 위해 일반형식이 아닌 smc 파일형식을 반드시 이용하여야 하며 응답스펙트럼값에 해당하는 출력형식은 binary 파일형식 및 일반표준 파일형식 중에서 1개 형식을 선택할 수 있다.

응답스펙트럼 값을 분석할 때 주파수의 범위는 sampling rate가 초당 100개이기 때문에 Nyquist 주파수에 해당하는 50 Hz까지 분석하였다. 하지만 약 30 Hz 이상의 고주파 영역의 지반진동은 일반적으로 빨리 감쇄할 뿐만 아니라 주요 구조물 전체에 심각한 영향을 미치지 않는다. 또한 비교대상인 국내 원자력시설물의 내진기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60에서도 약 33 Hz까지 제시되어 있다. 따라서 주파수 영역에 대한 여유를 감안하여 본 연구에서는 최대 주파수 50 Hz까지 분석하여 결과를 비교하였다.

정규화 과정

각 지진자료들은 측정거리의 변화에 따라서 서로 다른 최대 지반가속도를 가지고 있어, 서로 다른 최대 지반가속도를 가진 지반진동을 분석하여 얻어진 각각의 응답스펙트럼들을 조합하여 평균값을 구하는 것은 통계적으로 의미가 없다. 따라서 동일한 최대 지반가속도에 대해 스펙트럼을 정규화한 후에 스펙트럼을 구하는 것이 일반적이다. 정규화하는 방법으로 최대 지반가속도, 유효 최대가속도(Effective Peak Acceleration), 스펙트럼 강도(Spectral Intensity) 등 3가지 종류가 제시되어 있으나 본 연구에서는 최대지반가속도에 의한 정규화 과정을 적용하였다.

또한 최대 지반가속도에 의한 정규화 과정을 적용하는 방법으로서 세 가지 방법이 제시되어 있다. 우선, 각 지진자료의 최대 지반가속도가 동일한 값이

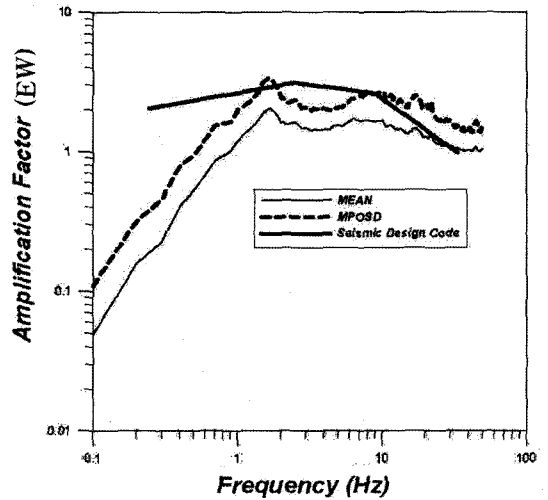


Fig. 3. Response spectrum for EW components (mean, MPOSD, and seismic design code).

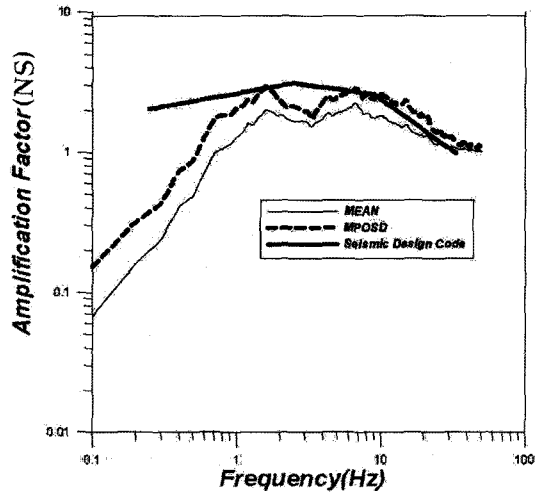


Fig. 4. Response spectrum for NS components (mean, MPOSD, and seismic design code).

되도록 지진자료를 비례적으로 조정하거나, 두 번째 방법으로 각 지진자료에 대한 응답스펙트럼을 구한 후에, 동일한 최대 지반가속도에 대한 응답스펙트럼이 되도록 스펙트럼 값을 비례적으로 조정하는 방법이 있다. 마지막으로, 각 지진자료에 대한 응답스펙트럼을 구할 때, 그 단위를 최대 지반가속도에 대한 배율을 이용하는 방법이 있다. 위에서 서술한 방법 중에서 세 번째 방법이 가장 널리 적용되고 있고 본 연구에서도 세 번째 방법을 적용하였다.

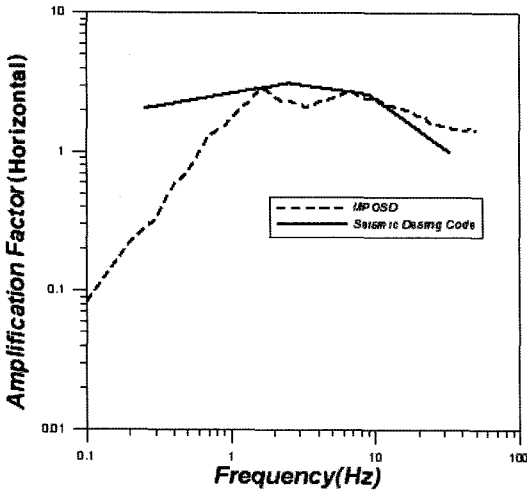


Fig. 5. Response spectrum for horizontal components (mean, MPOSD, and seismic design code).

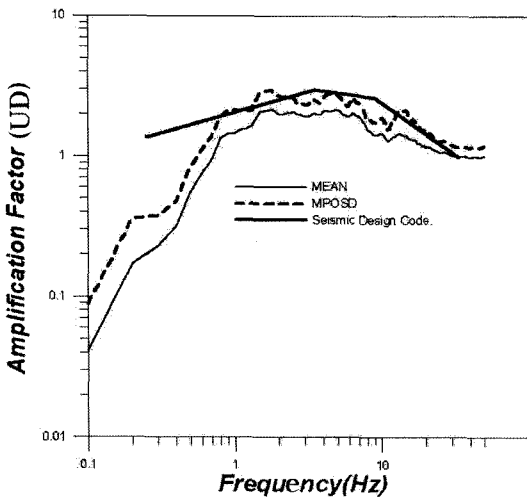


Fig. 6. Response spectrum for vertical components (mean, MPOSD, and seismic design code).

연구 결과

관측된 지반진동 자료를 이용하여 일반적으로 건축 및 토목 구조물의 감쇠율은 3%-7% 정도이기 때문에 응답스펙트럼을 5% damping 감쇠값에 대해 계산하였다. 결과를 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60 (Table 2)에서 제시하고 있는 값과 비교하였다. 본 연구에서 얻어진 응답스펙트럼 결과를 수평 및 수직 성분에 대해 Fig. 3, 4, 5, 및 6에서 제시하였다. 또한 Fig. 3, 4, 5, 및 6에서 알 수 있는 바와 같이 본

Table 2. Response spectrum values from Reg Guide 1.60 (5% damping)

& control point	33 Hz	9 Hz	2.5 Hz	0.25 Hz
horizontal components	1.0	2.61	3.13	2.50
vertical components	1.0	2.61	2.98	1.37

연구에서 도출된 연구결과 값은 50 Hz까지, 또한 내진설계 기준은 33Hz까지 응답값이 제시되어 있다.

Fig. 3은 EW 성분 그리고 Fig. 4는 NS 성분 지반진동을 이용하여 각각 분석된 결과로서 효과적으로 비교하기 위해 평균값, 평균값에 표준편차를 더한 값(MPOSD; Mean Plus One Standard Deviation) 그리고 내진설계 기준값(Seismic Design Code)을 동시에 제시하였다. Fig. 3 및 4에서 알 수 있는 바와같이 평균값 응답스펙트럼은 거의 대부분의 진동수 범위에서 내진설계 기준값을 초과하지 않고 있다. 하지만 표준편차가 더해진 EW 성분 및 NS 성분 응답스펙트럼은 약 1 Hz와 2 Hz 사이에서 기준값을 초과하거나 또는 거의 유사한 수준을 유지하고 있다. 또한 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역 전체에서 내진설계 기준값을 초과하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 5는 NS 성분 및 EW 성분 모두 동시에 고려한 수평성분 응답스펙트럼 결과를 보여주고 있다. 평균값에 표준편차를 더한 값 그리고 내진설계 기준값을 동시에 제시하여 비교를 쉽게 할 수 있도록 하였다. 표준편차가 더해진 수평 응답스펙트럼은 약 1 Hz와 2 Hz 사이에서 내진설계 기준값을 초과하고 있고 또한 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역 전체에서 역시 기준값을 초과하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 초과 주파수 대역 그리고 초과 수준 등의 특징은 Fig. 3 및 4에서 제시된 각각 성분을 분석한 결과와 유사한 특징을 보여주고 있다. 그리고 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60은 보수성을 확보하기 위해 평균값에 표준편차를 더한 값이기 때문에 본 연구결과 중에서 평균값에 표준편차를 더한 값을 내진설계 기준값과 비교하는 것이 실제 의미가 있다고 판단된다.

위에서 제시된 특징중에서 약 1 Hz와 2 Hz 사이에서 본 연구결과가 내진설계 기준값을 초과하는 현상은 국내의 지진관측소 부지증폭 특성이 부분적으로나마 기여하는 것으로 판단된다. 두 번째 특징으로 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역 전체에서 기준값을 초과하고 있으며, 원자력 산업계에서도 계속 지적되어

왔을 뿐만 아니라 윤종구 외(2006) 및 선창국 외(2007)의 연구에서도 그러한 문제점이 제시되었다.

Fig. 6은 수직성분 응답스펙트럼 결과를 보여주고 있으며 평균값, 표준편차를 더한 값 그리고 내진설계 기준값을 동시에 제시하여 비교를 쉽게 할 수 있도록 하였다. 수평 응답스펙트럼에 비해 주파수 전체 범위에서 변화가 상대적으로 많음을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 평균값 수직 응답스펙트럼은 거의 대부분의 진동수 범위에서 기준값을 초과하지 않음을 보여주고 있다. 하지만 표준편차가 더해진 수직 응답스펙트럼은 약 1 Hz와 2 Hz 사이에서 기준값을 초과하고 있다. 또한 10 Hz 이상의 대역 전체에서 내진설계 기준값을 초과하는 값을 보여주고 있다. 이러한 특징은 Fig. 5에서 제시된 NS 및 EW 성분이 모두 고려된 수평 응답스펙트럼의 특징과 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 수직성분 역시 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60 평균값에 표준편차를 더한 값이기 때문에 동일한 조건의 기준으로 비교하는 것이 실제 의미가 있다.

결 론

본 연구에서는 본 연구에서는 2007년 1월 20일 발생한 오대산지진으로부터 측정된 지반진동자료를 이용하였다. 오대산지진은 제주도 일부 지역을 제외하고는 전국에서 감지되어 관측자료가 비교적 풍부할 뿐만 아니라 한반도 내륙 중심부에서 발생하여 지진파 경로의 많은 부분이 한반도 내륙을 통과하기 때문에 한반도의 지진파 전달 특성을 대표하는 특성을 갖고 있어 본 연구에 이용되었다.

관측된 지반진동 자료를 이용하여 일반적으로 건축 및 토목 구조물의 감쇠율은 3%-7% 정도이기 때문에 5% damping 감쇠값에 대해 응답스펙트럼을 계산하였으며, 결과를 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60에서 제시하고 있는 값과 비교하였다.

표준편차가 더해진 수평 응답스펙트럼은 수평 및 수직 성분 모두 공통적으로 약 1 Hz와 2 Hz 범위에서 내진설계 기준값을 초과하고 있고 또한 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역 전체에서 역시 내진설계 기준값을 초과하는 2가지 특징을 갖고 있음을 보여주고 있다. 첫 번째 특징은 약 1 Hz와 2 Hz 범위에서 내진

설계 기준값을 초과하는 특징이고, 김준경(2003, 2005), 윤종구 외(2006), 선창국 외(2007) 및 김성균(2007)의 의해 제시된 국내 기존 연구에서 발견되지 않은 새로운 현상으로 이에 대해 향후 보다 자세한 연구가 필요하지만 국내 관측소 부지의 지반효과가 복합적으로 결부된 원인으로 추정된다.

두 번째 특징은 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역 전체에서 기준값을 초과하며 이러한 현상은 원자력 산업계에서도 계속 지적되어 왔었다. 또한 김준경(2003, 2005), 윤종구 외(2006), 선창국 외(2007) 및 김성균(2007) 등의 기존 연구에서도 10 Hz 이상의 고주파수 대역에서 기준값보다 초과하는 현상이 지적되었다. 물론 이에 대해 향후 보다 자세한 연구가 필요하지만 이러한 현상은 국내 지각의 주파수별 감쇠 특성과 관련되어 발생한 현상으로 판단된다.

따라서 향후 국내 실정에 적합한 내진설계를 위한 응답스펙트럼을 제시하기 위해 수직 및 수평 성분 모두 10 Hz 이상의 고주파수 대역에서 국내 지진원 및 전파특성을 고려하여 값을 심각하게 고려할 필요가 있다고 판단된다. 향후 오대산지진 뿐만 아니라 여타 국내에서 발생한 중규모 지진으로부터 관측된 속도 자료 및 광대역 자료를 보강하여 분석하면 대표성이 보다 보강되어 의미있는 결과를 얻을 수 있다. 또한 관측소 지반 증폭 특성에 대해 보다 많은 연구결과까지 고려할 경우 보다 의미있는 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술개발사업(CARTER 2007-5107)”에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김성균, 2007, 한반도 지진특성을 고려하여 모사된 강진동에 대한 가속도 응답스펙트럼. 한국지구과학회지, 28(2), 179-186.
- 김준경, 2003, 국내 지진의 응답스펙트럼 특성 분석. 한국 원자력안전연구원 연구보고서, 한국원자력안전기술원, 152 p.
- 김준경, 2005, 발파에 의한 지반진동의 응답스펙트럼 분석. 한국암반공학회, 15(5), 338-343.
- 윤종구, 김동수, 방은석, 2006, 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 계산에 대한 연구(I),

- 국내 내진설계기준의 문제점. 한국지질공학회, 10(2), 39-50.
- 선창국, 정충기, 김동수, 김재관, 2007, 역사지진 피해발생 음성지역에 재한 부지고유의 지진응답 평가. 한국지질공학회, 17(1), 1-13.
- Benioff, H., 1934, The physical evaluation of seismic destructiveness. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 24 (2), 88-97.
- Biot, J.A., 1941, A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 31 (2), 151-171.
- Boore, D.M., Joyner, W.B., and Fumal, T.E., 1994, Estimation of response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: An interim report, part 2. USGS Open File Report, Menlo Park, California, United States Geological Survey, 94-127.
- Converse, A.M. and Brady, A.G., 1992, BAP (Basic Strong Motion Accelerogram Processing Software (V1.0), United States Geological Survey.
- Housner, G.W., 1959, Behavior of Structures during Earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division, American Society of Civil Engineers*, 85(EM4.), 104-111.
- Newmark, N.M., Blume, J.A., and Kapur, K.K., 1973a, Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants. *Journal of Power Division, American Society of Civil Engineers*, 99 (2), 287-303.
- Newmark, N.M., and Hall, W.J., 1973b, Procedures and criteria for earthquake resistant design building practices for disaster mitigation. National Bureau of Standards, Building Research Series 46, U.S. Department of Commerce.
- Newmark, N.M., Hall, W.J., and Mohraz, B., 1973c, A study of vertical and horizontal earthquake spectra, report WASH-1255, Directorate of Licensing, U.S. Atomic Energy Commission.
- Regulatory Guide 1.60, 1968, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, USNRC.

2007년 9월 19일 접수
 2007년 11월 13일 수정원고 접수
 2007년 11월 20일 채택