

5개 중규모 지진의 속도 관측자료를 이용한 수평 응답스펙트럼 특성 분석

김준경*

Analysis of Characteristics of Horizontal Response Spectrum of Velocity Ground Motions from 5 Macro Earthquakes

Jun-Kyoung Kim

Abstract The velocity horizontal response spectra using the observed ground motions from the recent 5 macro earthquakes, equal to or larger than 4.8 in magnitude, around Korean Peninsula were analysed and then were compared to the acceleration horizontal response spectra, seismic design response spectra (Reg Guide 1.60), applied to the domestic nuclear power plants, and finally the Korean Standard Design Response Spectrum for general structures and buildings. 102 velocity horizontal ground motions, including NS and EW components, were used for velocity horizontal response spectra and then normalized with respect to the peak velocity value of each ground motion. First, the results showed that velocity horizontal response spectra have larger values at the range of medium natural period, but acceleration horizontal response spectra have larger values at the range of short natural periods. Secondly, the results also showed that velocity horizontal response spectra exceed Reg. Guide 1.60 for longer natural periods bands less than 6-7 Hz. Finally, the results were also compared to the Korean Standard Response Spectrum for the 3 different soil types(SC, SD, and SE soil type) and showed that velocity horizontal response spectra revealed much higher values for the frequency bands below 1.5(SC), 2.0(SD), and 3.0(SE) seconds, respectively, than the Korean Standard Response Spectrum. The results suggest that the fact that acceleration, velocity, and displacement horizontal response spectra have larger values at the range of short, medium, and long natural periods, respectively, can be applied consistently to those form domestic ground motion, especially, the velocity ground motion. Information on response spectrum at such medium range periods can be very important since the domestic design of buildings and structures emphasizes recently medium and long natural periods than short one due to increased super high-rise buildings.

Key words Velocity horizontal response spectrum, Reg Guide 1.60, Korean Standard Design Response Spectrum

초 록 최근 한반도 및 주변해역에서 발생한 규모 4.8 이상의 5개 중규모 지진으로부터 관측된 속도 지반운동 파형을 이용하여 수평 응답스펙트럼을 분석하고 결과를 우선 가속도 지반운동을 이용하여 얻어진 수평 응답스펙트럼, 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준, 마지막으로 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다. 연구에 이용된 지반운동은 수평성분 102개(NS 및 EW 성분 포함)이며 고유진동수에 따른 응답을 구하고 각각의 최대 지반 속도 값을 이용하여 정규화 분석을 수행하였다. 첫째, 가속도 응답스펙트럼과 비교한 결과 속도 응답스펙트럼 값은 특히 중간주기에서 높은 응답을 보여 주었고 이에 비해 가속도 응답스펙트럼은 특히 단주기 즉 높은 고유진동수 영역에서 높은 응답을 보여 주었다. 둘째, 국내 원자력시설물의 내진기준으로 이용되고 있는 Reg. Guide 1.60과 비교한 결과 속도 응답스펙트럼 값은 약 6-7Hz를 시작점으로 보다 낮은 장주기 영역에서 기준값을 초과하는 현상을 보여 주었다. 셋째, 500년 재래주기에 해당하는 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준인 표준 설계응답스펙트럼을 SC, SD 및 SE지반 조건과 같은 3개 지반조건과 동시에 비교한 결과 차례로 약 1.5초, 2초 및 3초에서 시작하여 보다 장주기 영역에서 국내 일반 구조물 표준 설계 응답스펙트럼값을

¹⁾ 세명대학교 소방방재학과

* 교신저자 : kjk-512@semyung.ac.kr

접수일 : 2011년 10월 17일

심사 완료일 : 2011년 12월 1일

게재 확정일 : 2011년 12월 7일

초과하였다. 동일한 부지에서 일반적으로 가속도 응답스펙트럼은 단주기에서 가장 큰 값을 나타내며, 속도 응답스펙트럼은 중간주기에서 가장 크며, 마지막으로 변위 응답스펙트럼은 장주기에서 가장 큰 값을 가진다는 국외 연구결과가 국내 지반운동을 이용한 결과에서 역시 적용가능하다는 점을 확인시켜 주었다. 최근 국내에서도 건축물의 초고층화 등으로 구조물의 디자인이 기존의 단주기에 비해 중간주기 및 장주기 영역이 상대적으로 강조되고 있어 이러한 중간주기영역에서 수평 응답스펙트럼의 정보는 향후 대단히 중요하다고 할 수 있다.

핵심어 속도 수평응답스펙트럼, Reg. Guide 1.60, 표준 설계응답스펙트럼

1. 서론

일반적으로 설계응답스펙트럼을 이용하여 임의의 지역에서의 구조물의 설계지반운동의 특성이 표현된다. 설계응답스펙트럼은 우리나라 고유의 지진지체구조 특성, 진앙거리에 따른 감쇠 특성 및 고유주기 등을 반드시 고려하여야 한다. 그러나 국내의 경우 해당 분야에 대한 연구가 충분하지 못해 1997년에 건설교통부에 의해 제시된 건축물 및 구조물을 위한 설계응답스펙트럼(건설교통부, 1997)을 약 10여년 동안 개정없이 아직 동일한 기준을 계속 채택해오다가 최근 활발하게 개정이 진행중에 있다.

응답스펙트럼에 대한 연구는 최초로 Benioff(1934)에 의해 시작되어 Biot(1941) 및 Housner(1959) 등에 의해 본격적으로 연구 및 응용이 시작되었다. 이후 Newmark et. al.(1973a, 1973b, 1973c), Boore & Joyner(1994) 등에 의하여 응답스펙트럼에 대한 연구가 활발하게 수행되어 왔다. 지금까지 국내에서 수행된 연구는 주로 가속도 지반운동을 이용하여 왔고 원자력산업 분야와 관련하여 수행되어 왔으며 김준경(2005, 2009, 2011) 김준경 외(2010), 윤종구 외(2006), 선창국 외(2007)가 있다. 최근 한반도 주변 지역 특히 일본 동북부 및 중국 쓰촨에서 초대형 지진이 자주 발생하여 천문학적인 인명 및 재산피해를 발생시키고 있어 향후 국내 각종 주요 구조물에 대한 내진설계 응답스펙트럼 분야에 대해 인식이 제고되고 있다.

일반적으로 응답스펙트럼 특성에 의하면 동일한 부지에서 일반적으로 가속도 응답스펙트럼은 단주기에서 가장 커다란 값을 나타내며, 속도 응답스펙트럼은 중간주기에서 가장 크며, 마지막으로 변위 응답스펙트럼은 장주기에서 가장 큰 값을 가진다. 강성이 매우 커다란 구조물일 경우 단주기 영역보다 짧은 주기의 영역에서 가속도 스펙트럼 값이 최대 지반가속도 값과 거의 비슷하게 되며, 매우 유연한 구조물일 경우 장주기 영역보다 큰 주기의 영역에서 변위 스펙트럼 값이 최대 지반 변위 값과 거의 비슷하게 되는 성질을 가지고 있다. 따

라서 응답스펙트럼은 단주기 영역, 중간주기 영역 및 장주기 영역과 같이 3개의 주기 영역의 정보를 모두 이용하여 구성되어야 한다. 3개의 주기 영역 특성을 동시에 효과적으로 표현한 것이 Tripartite 혹은 Four-Way Logarithmic Plot이다. 미국 원자력 규제위원회가 처음 제정하였고 국내 원자력 내진설계기준이 준용하고 있는 Reg. Guide 1.60 기준의 수평성분 표준응답스펙트럼 역시 지반운동의 3개영역 주기 의존성을 모두 반영하여 제정된 스펙트럼이다.

Housner(1959)와 Newmark et. al.(1973a, 1973b, 1973c)과 같이 초기의 응답스펙트럼 개발자들은 가속도가 아닌 다수의 관측된 변위 지반운동을 처리하여 개개 지반운동에 대한 응답스펙트럼을 분석하고 이를 통계적으로 조합하였다. 통계적으로 조합된 응답스펙트럼을 이용하여 단주기의 유사 가속도 스펙트럼값에서 최대지반 가속도에 대한 일정한 배율을, 중간 주기에서 유사 속도 스펙트럼값에서 최대지반 속도에 대한 일정한 배율을, 장주기 영역의 변위 스펙트럼값에서 최대지반 변위에 대한 일정한 배율을 구하였다. 따라서 단주기, 중간주기 및 장주기 등 3종류의 주기영역에서 분석된 배율을 종합적으로 적절하게 조합하여 구조물의 설계스펙트럼이 제시되고 있다. 따라서 원리적으로 단주기, 중간주기 및 장주기 등 3종류의 주기영역에서 분석된 정보가 모두 필요하다.

또한 최근 건축물의 대형화 및 초고층화 하는 경향이 있어 구조물 디자인이 단주기가 주로 강조되고 있는 FB(Force Base) 디자인으로부터 장주기가 상대적으로 더욱 강조된 DB(Displacement Base) 디자인으로 이동하는 경향도 일부 있다. 그런데 최근 광대역 관측기기가 널리 보급되고 있으나 주로 속도 또는 가속도 형태로 관측되기 때문에 변위 지반운동의 직접적인 관측이 거의 불가능하여 장주기 영역에 대한 특성을 직접적으로 얻는다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 장주기 영역의 응답스펙트럼의 특성에 대한 정보를 직접적으로 얻는 것은 거의 불가능하지만 대신에 속도형태로 관측된 지반운동을 이용하여 상대적으로 보다 장주기 영역

의 응답스펙트럼의 특성에 대한 정보를 보완적으로 구할 수 있다.

앞서 언급된 국내의 대부분의 연구는 주로 단주기 영역 즉 가속도 지반운동의 처리를 통하여 분석한 연구가 주류를 이루어 있어 즉 강성이 매우 커다란 구조물의 거동특성과 관련되는 연구에 치우쳐 있다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 국내에 속도 관측소가 많이 설치되어 특히 속도 지반운동이 풍부하다는 점을 고려하였다. 가속도 지반운동이 아니고 속도 지반운동을 직접 처리하여 국내 지진발생 특성 및 관측소의 지반환경이 충분히 고려된 중간주기 영역의 응답스펙트럼 특성을 분석하고자 시도하였다.

최근 연구결과에 의하면 관측자료 형태는 물론이고 다른 여러 가지 인자가 응답스펙트럼의 특성에 영향을 미친다고 알려져 있다. 특히 고유진동수, 진앙거리, 부지의 지반 종류, 지진규모 및 지진원의 단층운동 형태 등에 의해 영향이 크게 작용하고 있다는 연구결과들이 발표되고 있다(Bozorgnia and Campbell, 2004; Elgamal and He, 2004).

최근 한반도 및 주변 해역에서 발생한 규모 4.8 이상의 5개 중규모 지진으로부터 관측된 속도 지반운동을 이용하여 중간주기의 응답스펙트럼을 분석하였고 결과를 가속도 응답스펙트럼, 국내에서 가장 엄격하게 적용하고 있는 것으로 알려진 원자력시설물에 관한 내진설계 기준, 마지막으로 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다.

2. 지반운동 자료

본 연구에서는 최근 발생한 규모 4.8 이상의 5개 지진으로부터 측정된 지반운동 자료를 고려하였고 이 중에서 잡음이 비교적 작은 지반운동만을 이용하였다. 특히 최근에 오대산지역에서 발생한 지진(규모 4.9)은 2004년 발생한 울진지진(규모 5.1) 이래로 최근 보기

드물게 중규모에 해당하는 지진이다. 또한 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 있다.

본 연구에서 사용한 지반운동의 지진발생 일자 및 관측된 지반운동의 해당 관측소는 Fig. 1 및 Table 1에 제시되어 있다. 이 논문에서는 수평 성분(수평 성분)에 해당하는 EW 및 NS 성분 각각 51개 모두 102개 지반운동 자료를 처리하여 분석하였다. 자료타입은 속도형식이며, 샘플링 간격은 1초당 100개이다. 또한 관측된 지반운동의 관측소의 지반특성은 국내의 연구결과가 아직 충분하지 못하여 고려하지 않았다. 향후 많은 연구가 필요한 분야이다. 최근 발생한 중규모이상의 지진으로부터 측정된 지반운동 자료를 이용하여 우선 푸리에 스펙트럼 등을 분석하였고, 분석 결과중에서 S/N비가 낮은 지반운동의 수평성분을 모두 제외하였다.

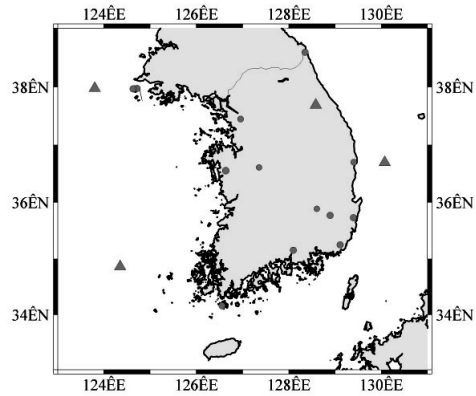


Fig. 1. Locations of epicenter (triangle) and seismic stations (circle) of 5 macro earthquakes.

Table 1. Occurrence date, magmitude, and seismic stations for this study

Occurrence Date	M ^L (KIGAM)	Station Name	Station No.
2002/07/23	5.0	BRD, CHNB, GKPI, GSU, HKU, NPR, SNU, TJN	8
2003/03/23	5.1	BGD, BRD, CHNB, GKPI, GSU, HKU, HSB, NPR, SNU, TJN	10
2003/03/30	4.8	BRD, CHNB, GKPI, GSU, HKU, HSB, NPR, SNU, TJN	9
2004/05/29	5.1	BGD, BRD, CHNB, GKPI, GSU, HDB, HKU, HSB, JRB, NPR, SNU, TJN	12
2007/01/20	4.9	BGD, BRD, CHNB, GSB, JRB, JSB, KSA MGB, NPR, SND, TJN, YKB	12
Total	-	-	51

3. 지반운동 응답스펙트럼 및 연구방법

일반적으로 지진 등의 용인에 의하여 발생한 지반진동이 동적하중을 생성시키고 이러한 동하중에 의해 단성단자유도계 구조물의 최대반응을 이용하여 지반운동에 대응하는 구조물의 응답스펙트럼은 표현된다. 일정한 범위내의 구조물의 고유 진동수 또는 고유 주기에 대해 우선 구조물의 상대변위, 상대속도 및 절대가속도 등 3종류의 반응을 먼저 계산하고 상대변위, 상대속도 및 절대가속도 등 각각에 대해 최대반응을 구할 수 있다. 유사 가속도스펙트럼, 속도스펙트럼 및 변위스펙트럼 상호 관계식은 김준경(2010)에 제시되어 있고 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} PS_A(\zeta, \omega) &= |\ddot{x}(t)|_{\max} \\ &= |[-2\zeta\omega\dot{u}(t) - \omega^2 u(t)]|_{\max} \\ &= |\omega^2 u(t)|_{\max} \\ &= \omega^2 PS_D(\zeta, \omega) \\ &= \omega PS_V(\zeta, \omega) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $u(t)$ 는 상대변위, ω 는 고유진동수(rad/sec), ζ 는 감쇠비, $\dot{u}(t)$ 는 상대속도, 속도, $\ddot{x}(t)$ 는 절대가속도를 각각 나타낸다. PS_A , PS_D 및 PS_V , 는 각각 유사가속도 스펙트럼, 유사변위 스펙트럼 및 유사속도 스펙트럼을 나타낸다.

응답스펙트럼 분석을 위해 입력되는 지반운동의 시간 길이를 조절할 필요가 있고 진앙거리에 관련된 관계식을 적용하였다. 또한 응답스펙트럼을 계산할 때 주기 또는 고유진동수의 범위는 0.1Hz부터 50Hz까지 범위에서 0.1Hz씩 증가시키면서 500개의 고유진동수 각각에 대해 반응을 계산하였다.

약 30Hz 이상의 높은 고유진동수 영역의 지반운동은 일반적으로 빨리 감쇠할 뿐만 아니라 주요 구조물 전체에 심각한 구조적인 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 또한 국내 원자력시설물의 내진기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60에서도 약 33Hz까지만 값이 제시되어 있다. 하지만 고유진동수 영역에 대한 여유를 감안하여 최대 고유진동수 50Hz까지 응답을 계산하여 그 결과를 상호 비교하였다. 물론 구조물마다 다양한 고유주기를 갖고 있지만 대부분의 토목 및 건축 구조물의 경우 약 1Hz에서 약 5Hz의 범위에서 고유진동수 조건을 가지고 있으므로 특히 앞서 제시된 단주기에서 중간 고유주기에 걸치는 범위에서 구조물의 응답 특성이 대단히 중요하다.

각 지진으로 관측된 지반운동 자료들은 측정거리, 지진규모, 지반조건 등의 다양한 인자들의 변화에 따라서

서로 다른 최대 지반속도값을 가지고 있어, 지반운동을 분석하여 얻어진 각각의 응답스펙트럼들을 단순하게 조합하여 통계적으로 처리하는 것은 의미가 없다. 따라서 동일한 최대 지반속도에 대해 각각의 응답스펙트럼을 정규화한 후에 스펙트럼을 구하는 것이 일반적이다. 정규화하는 방법으로 최대 지반속도, 유효 최대속도 (Effective Peak Acceleration) 및 스펙트럼 강도(Spectrum Intensity) 을 이용하는 방법 등 3가지 종류로 분류하고 있으나 본 연구에서는 속도 지반운동을 이용하고 있어 가장 자주 적용되고 있는 최대지반속도에 의한 정규화 방법을 적용하였다.

4. 연구 결과

일반적으로 건축 및 토목 구조물은 감쇠율이 3%에서 7%의 범위를 가지고 있고 이중에서 가장 일반적으로 비교되고 있는 5% 감쇠값에 해당하는 응답을 계산하였다. 분석결과를 우선 가속도 응답스펙트럼과 비교하였다. 다음에 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60(Table 2.) 및 국내 일반 구조물 및 건축물에 대한 내진설계기준과 비교하였다. 국내 원자력발전소 내진설계기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60은 국내 일반 구조물 및 건축물에 대한 내진설계기준과는 달리 수평 및 수직 성분에 대해 분리하여 기준을 각각 제시하고 있다.

국내에서 발생한 규모 4.8 이상의 5개 지진 각각에 대해 평균값 및 표준편차를 더한 속도응답 스펙트럼을 결과를 Fig. 2에서 Fig. 6까지 제시하였다. 또한 규모 4.8 이상의 5개 지진전체에 대해 5개 지진 전체평균값 및 표준편차를 더한 속도응답스펙트럼을 Fig. 7에 제시하였다. 각각의 그림에서 가로축은 구조물의 고유 진동수 (단위 Hz)를 나타내고 세로축은 정규화를 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 의미한다. 규모 4.8 이상의 5개 지진 각각에 대해 평균값 및 표준편차를 더한 속도응답 스펙트럼들은 대체로 유사한 형태 특성 및 비슷한 응답값을 보여 주고 있다. 속도응답값의 최대값의 크기는 지진에 관계없이 공통적으로 약 0.7에서 1사이의 값을 보여주고 5개 지진 그룹사이에 큰 차이가 없음을 보여

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

Comp. & Control Point	33Hz	9Hz	2.5Hz	0.25Hz
Horizontal Component	1.0	2.61	3.13	2.50
Vertical Component	1.0	2.61	2.98	1.37

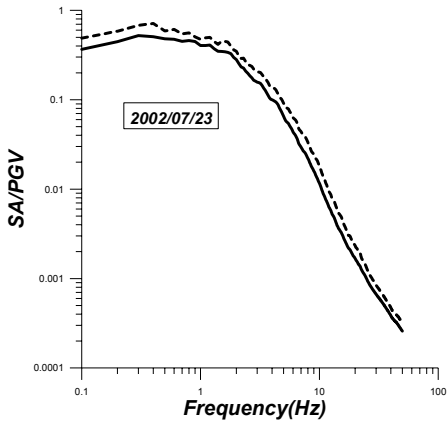


Fig. 2. Horizontal velocity response spectrum, from 2002/07/23 event

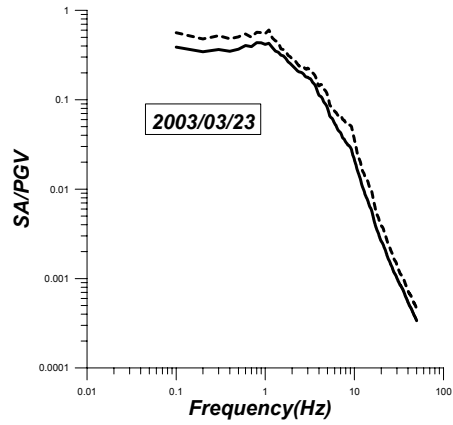


Fig. 3. Horizontal velocity response spectrum, from 2003/03/23 event

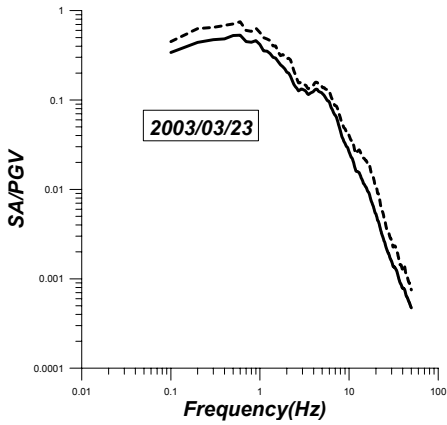


Fig. 4. Horizontal velocity response spectrum, from 2003/03/30 event

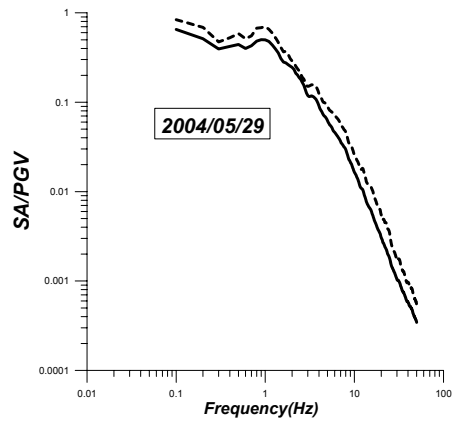


Fig. 5. Horizontal velocity response spectrum, from 2004/05/29 event

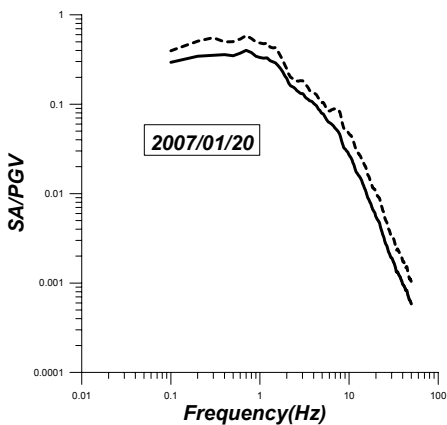


Fig. 6. Horizontal velocity response spectrum, from 2007/01/20 event

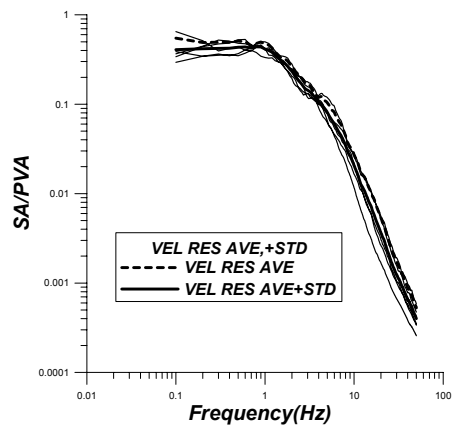


Fig. 7. Velocity horizontal response spectrum of 5 events

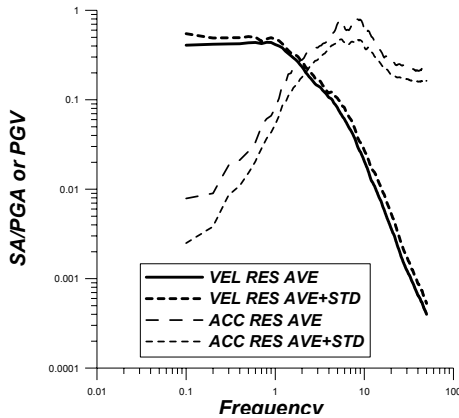
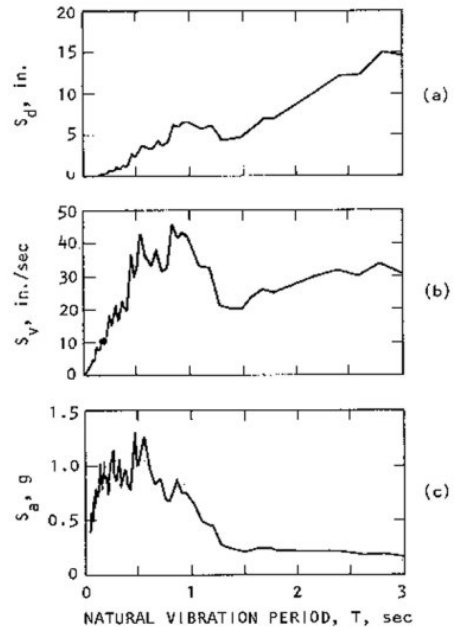


Fig. 8. Comparison of horizontal velocity response spectrum with acceleration response spectrum

주고 있다. 또한 Fig. 7에 제시된 바와 같이 전체 고유진동수 영역에서 표준편차값이 아주 작아서 규모 4.8 이상의 5개 중규모지진에 대해 응답값이 대체로 안정되게 얻어졌음을 알 수 있다.

속도 응답스펙트럼의 분석결과를 가속도 응답스펙트럼과 Fig. 8에 함께 비교하였다. Fig. 8에서 가로축은 구조물의 고유진동수(단위 Hz)를 나타내고 세로축은 정규화를 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 의미한다. 속도지반운동을 이용한 응답스펙트럼의 평균값 및 표준편차를 더한 값은 중간주기에서 높은 응답을 보여주고 가속도 응답스펙트럼 평균값 및 표준편차를 더한 값은 단주기 즉 높은 고유진동수 영역에서 높은 응답을 보여주고 있다. 이러한 결과는 앞서 제시된 바와 같이 일반적으로 가속도 응답스펙트럼은 단주기에서 가장 커다란 값을 나타내며, 속도 응답스펙트럼은 중간 주기에서 가장 크며, 마지막으로 변위 응답스펙트럼은 장주기에서 가장 큰 값을 가진다는 사실과 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 국외 연구결과가 국내 지반운동을 이용한 결과에서 역시 적용가능하다는 점을 확인시켜 주었다. 미국 원자력 규제위원회가 처음 제정하였고 국내 원자력 내진설계기준이 준용하고 있는 Reg. Guide 1.60 기준의 수평성분 표준응답스펙트럼 역시 이러한 지반운동의 주기 의존성을 충분히 반영하여 중간주기는 속도 응답스펙트럼 정보를 그리고 단주기는 가속도 응답스펙트럼 정보를 이용한 스펙트럼이다.

Fig. 9는 1940년 5월 18일에 미국 California주의 El Centro 지역에서 발생한 지진으로부터 관측된 변위 지반운동을 이용하였으며 가장 상부 그림은 변위응답스펙트럼, 중간 그림은 상대속도 응답스펙트럼, 가장 아래 그림은 상대가속도 응답스펙트럼이다. 국내 내진설계



El Centro S 00°E (1940) $\xi = 0.02$

Fig. 9. Comparison of horizontal response spectrum among displacement, velocity, and acceleration from El Centro event

분야에서도 El Centro 지역에서 발생한 지진으로부터 관측된 변위 지반운동을 비교연구를 위해 자주 사용되며 고전으로 이용되는 지반운동이다. 가로축은 고유진동수 대신에 구조물의 고유주기로 변환하여 사용되었으며 세로축은 정규화 과정을 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 나타낸다.

Fig. 9에서 가장 상부 그림인 변위응답스펙트럼은 그림의 오른쪽 즉 장주기에서 가장 큰 값을 보여주고, 중간 그림인 상대속도 응답스펙트럼은 상대적으로 중간 주기에서 가장 커다란 값을 보여주고, 가장 아래 그림은 상대가속도 응답스펙트럼으로 그림의 왼쪽 즉 단주기에서 가장 커다란 값을 보여주고 있다. 동일한 부지에서 일반적으로 가속도 응답스펙트럼은 단주기에서 가장 커다란 값을 나타내며, 속도 응답스펙트럼은 중간 주기에서 가장 크며, 마지막으로 변위 응답스펙트럼은 장주기에서 가장 큰 값을 갖는 것으로 나타나고 있어 지반운동 종류에 따라 변하는 강한 고유주기 의존성을 확인시켜주고 있다. 고유주기에 대한 강한 의존성은 앞서 Fig. 8에서 제시한 본 연구결과와 경향과 대체로 일치하는 특징을 보여주고 있다.

규모 4.8 이상의 5개 지진 전체에 대해 평균값 및 표준

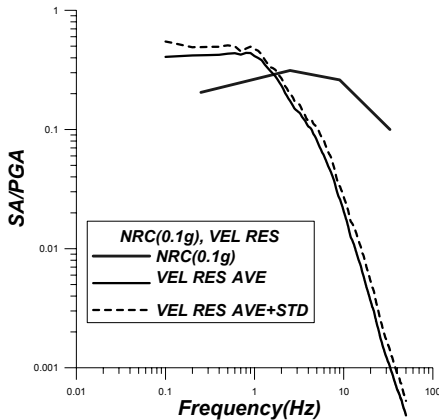


Fig. 10. Comparison of horizontal velocity response spectrum with US NRC Standard Response Spectrum

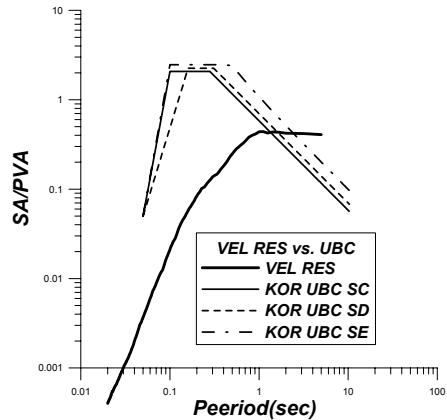


Fig. 11. Comparison of horizontal velocity response spectrum with Korean Building Standard Response Spectrum

편차를 더한 속도 응답스펙트럼을 국내 원자력 내진설계기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60 기준의 수평성분 표준응답스펙트럼(Table 2)과 비교하여 Fig. 10에 제시하였다. Fig. 10에서 제시된 Reg. Guide 1.60 기준의 수평성분 표준응답스펙트럼은 가속도 0.1g에 해당하는 기준이다. 가속도 0.1g 값은 국내 대부분 원자력발전소의 SSE 및 OBE와 같이 2개의 대표되는 내진설계기준 가운데 하나에 해당하는 OBE(Operating Basis Earthquake) 설계기준에 해당한다. 가로축은 고유진동수를 나타내고 세로축은 정규화된 반응값의 증폭계수를 나타낸다. 또한 본 연구에서 분석된 응답스펙트럼 결과 값은 50Hz 까지, 또한 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준은 33Hz까지 응답값이 제시되어 있다.

Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 속도 응답스펙트럼은 앞서 제시한 바와 같이 고유진동수가 감소할수록 수평성분 응답스펙트럼이 점진적으로 증가하고 있음을 잘 보여주고 있다. 이러한 현상은 김준경(2010)의 Fig. 7에서 제시된 가속도 지반운동을 이용한 수평성분 스펙트럼이 고유진동수가 증가할수록 응답값이 점진적으로 증가하는 현상과 대조되는 현상이다. 또한 Fig. 10에서 약 2Hz를 시작점으로 보다 장주기 영역으로 갈수록 속도 성분 수평성분 응답스펙트럼이 0.1g기준에 적합된 Reg. Guide 1.60 보다 크게 초과하고 있음을 보여주고 있다. 이에 비해 김준경(2010)의 Fig. 7에서 제시된 가속도 응답스펙트럼은 약 6-7Hz를 시작점으로 높은 고유진동수 영역에서 기준값을 초과하는 현상을 보여 주었다. 이러한 특징은 앞서 지적한 바와 같이 동일한 부지에서 일반적으로 가속도 응답스펙트럼은 단주기에서, 속도 응답스펙트럼은 중간주기에서, 마지막으로 변위 응답스

펙트럼은 장주기에서 가장 큰 값을 가진다는 사실을 다시 한 번 더 확인시켜 주고 있다.

더구나 최근 건축물의 초고층화 등으로 구조물 디자인이 단주기가 강조되고 있는 FB(Force Base) 디자인으로부터 보다 중간주기 및 장주기 영역에 대한 응답스펙트럼 정보가 상대적으로 강조되고 있어 속도 응답스펙트럼으로부터 중간주기에 대한 수평 응답스펙트럼 정보는 대단히 중요하다고 할 수 있다.

가속도 응답스펙트럼을 이용하여 특히 약 5Hz 이상의 단주기 영역 전체에서 기준값을 초과하고 있는 현상은 국내 원자력 산업계에서도 계속 지적되어 왔을 뿐만 아니라 윤종구 외(2006) 및 선창국 외(2007)의 연구에서도 유사한 특징이 이미 제시되어 왔다. 국내에서 직접 관측된 속도 지반운동을 분석하여 얻어진 응답스펙트럼의 중간주기 특성에 대한 구체적인 연구는 아직 없는 실정이다.

마지막으로 속도 지반운동을 분석하여 얻어진 수평성분 응답스펙트럼을 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼과 동시에 비교하였다(Fig. 11). 국내 일반 건축물에 대한 기준은 고유주기를 사용하고 있어 Fig. 11에서 가로축은 일반건축물의 표준 응답스펙트럼과 비교를 쉽게 하기 위해 고유진동수 대신에 구조물의 고유주기로 변환하여 사용하였으며 세로축은 정규화 과정을 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 나타낸다. 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준은 원자력시설물의 내진설계 기준과는 달리 수평 및 수직 성분의 스펙트럼 모양을 분리하지 않고 수직 응답스펙트럼은 수평 응답스펙트럼의 값을 축소하여 적용하고 있다.

국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼을 주어진 지역에 적합하게 구체화하기 위해 우선 내진설계 대상지역의 지진구역 (seismic province)과 5개 지반종류에 적합한 각각 2가지 종류의 지진계수(Ca 및 Cv)를 선정하여야 한다. 이를 이용하여 표준 설계 응답스펙트럼의 통제주기(Ts 및 To)를 선정한다. 마지막으로 건물의 중요도 및 사회적으로 요구되는 성능기준을 판단하여 재현주기(recurrence period)에 따른 지진위험도계수(seismic hazard coefficient)에 따라 값과 모양 특성을 다르게 정의하고 있다.

Fig. 11에서 가는 실선 및 파선들로 이루어진 3개 응답의 재래주기는 공통적으로 500년이고 가로축에 가까운 곡선으로부터 점차 멀어지는 순서대로 지반조건 SC, SD 및 SE 조건에 대응하는 표준 설계응답스펙트럼이다. 예를 들면 그림에서 SE 지반조건에서는 건축물을 내진설계 할 경우 다른 2개 지반조건에 비해 내진설계 기준값이 상대적으로 크게 제시되어 있으므로 내진설계를 보다 강화하여 적용해야 하는 것을 의미한다. 지반조건 SE, SD 및 SC와 같은 3개의 지반조건을 선택한 것은 국내 관측소 지반은 SD조건에 해당하는 것이 많은 부분을 차지하고 있고 일부 SC 및 SE 조건의 지반으로 이루어져 있기 때문이다.

속도지반운동을 분석한 수평성분 응답스펙트럼은 SC, SD 및 SE 조건의 기준과 비교할 때 차례로 약 1.5초, 2초 및 3초에서 시작하여 보다 장주기 영역에서 500년 재래주기의 국내 일반 구조물 표준 설계 응답스펙트럼 값을 초과하고 있다. 이러한 현상은 김준경(2010)의 Fig. 8에서 가속도 지반운동을 이용한 수평성분 스펙트럼이 고유진동수가 증가할수록 응답값이 점진적으로 증가하는 현상과 대조되는 현상이다. 이러한 특징은 앞서 지적한 바와같이 동일한 부지에서 일반적으로 가속도 응답스펙트럼은 단주기에서 가장 커다란 값을 나타내며, 속도 응답스펙트럼은 중간 주기에서 가장 크며, 마지막으로 변위 응답스펙트럼은 장주기에서 가장 큰 값을 가진다는 사실을 다시 한번 더 확인시켜 주고 있다. 이는 앞서 제시된 국내 원자력 내진설계기준에 해당하는 설계기준지진값 0.1g에 해당하는 Reg. Guide 1.60 기준과 비교한 결과와 공통적으로 유사한 고유주기에 대한 강한 의존 특징을 갖고 있음을 확인시켜 주었다.

5. 결론

최근 연구결과에 의하면 여러 가지 인자가 응답스펙트럼의 특성에 영향을 미친다고 알려져 있다. 특히 이전 연구결과에 의하면 구조물의 고유진동수, 진앙거리,

부지의 지반 종류, 지진규모 및 지진원의 단층운동 형태 등에 의한 영향이 크다고 발표되고 있다. 본 연구는 속도 지반운동을 이용하여 여러 가지 영향인자 가운데 특히 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 구조물의 고유 진동수에 의한 영향을 분석하였다.

1. 최근 한반도 및 주변해역에서 발생한 규모 4.8 이상의 5개 중규모의 지진으로부터 관측된 속도 지반운동을 이용하여 속도지반운동에 대한 응답스펙트럼 분석결과를 가속도 응답스펙트럼과 비교한 결과 속도지반운동에 대한 응답스펙트럼값은 중간주기에서 가장 높은 응답을 보여 주었고 가속도 응답스펙트럼값은 단주기 즉 높은 고유진동수 영역에서 가장 높은 응답을 보여 주고 있다. 이러한 결과는 한반도 및 주변해역에서 발생한 규모 4.8 이상의 5개 중규모의 지진으로부터 관측된 속도 및 가속도 지반운동에도 장단주기에 대한 강한 의존 특성이 적용되고 있음을 확인하였다.
2. 속도지반운동을 분석한 수평성분 응답스펙트럼은 앞서 제시한 바와 같이 고유진동수가 감소할수록 수평성분 응답스펙트럼이 점진적으로 증가하고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 약 2Hz 이하의 보다 장주기 영역에서 속도성분 수평성분 응답스펙트럼이 0.1g 기준에 적합된 Reg. Guide 1.60 보다 초과하고 있음을 보여주었다. 동일한 부지에서 일반적으로 가속도 응답스펙트럼은 단주기에서, 속도 응답스펙트럼은 중간 주기에서, 마지막으로 변위 응답스펙트럼은 장주기에서 가장 큰 값을 가진다는 사실을 다시 한번 더 확인시켜 주고 있다.
3. 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼과 동시에 비교를 한 결과, 속도지반운동을 분석한 수평성분 응답스펙트럼은 SC, SD 및 SE지반 조건의 기준과 비교할 때 차례로 약 1.5초, 2초 및 3초에서 시작하여 보다 장주기 영역에서 500년 재래주기의 국내 일반 구조물 표준 설계 응답스펙트럼값을 초과하였다. 속도 응답스펙트럼은 중간 주기에서 가장 큰 값을 가진다는 사실을 원자력 발전소 내진설계기준과의 비교에 이어 다시 한번 더 확인시켜 주고 있다.
4. 속도 응답스펙트럼으로부터 중간주기에 대한 수평 응답스펙트럼 정보를 2개 내진설계기준과의 비교를 통하여 충분히 확인 할 수 있었고 이러한 중간주기에 대한 정보는 최근 국내에서도 건축물의 초고층화 등으로 구조물의 디자인이 기존의 단주기에 비해 중간주기 및 장주기 영역이 상대적으로 강조되고 있어

향후 대단히 중요하다고 할 수 있다. 따라서 향후 지진데이터베이스를 질적 및 양적으로 보완 또는 확장함과 정규화를 위한 방법을 다양화 하는 등을 통해 보다 다양한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술개발사업(CARTER 2007 -5109)”에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 1997, 내진설계기준개발 2단계 연구, 한국지진공학회.
2. 김성균, 2007, 한반도 지진특성을 고려하여 모사된 강진동에 대한 가속도 응답스펙트럼, 한국지구과학회지, 28, 2, 179-186.
3. 김준경, 2005, 발파에 의한 지반진동의 응답스펙트럼 분석, 한국암반공학회, 15, 5, 338-343.
4. 김준경, 2009, 최근 발생지진 관측자료를 이용한 응답스펙트럼 분석, 한국암반공학회, 19, 6, 490-497.
5. 김준경, 홍승민, 박기중, 2010, 국내 관측자료를 이용한 수직응답스펙트럼 특성 분석, 지구물리와 물리탐사, 13, 3, 227-234.
6. 김준경, 2011, 국내 관측자료를 이용한 응답스펙트럼의 수직/수평비 특성 분석, 한국지반환경공학회, 12, 1, 83-89.
7. 선창국, 정충기, 김동수, 김재관, 2007, 역사지진 피해발생 음성지역에 대한 부지규의 지진응답 평가, 한국지질공학회, 17, 1, 1-13.
8. 윤종구, 김동수, 방은석, 2006, 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 계산에 대한 연구(I), 국내 내진설계기준의 문제점, 한국지진공학회, 10, 2, 39-50.
9. Benioff, H., 1934, The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness, Bulletin of the Seismological Society of America, 24, 2, 88-97.
10. Biot, J. A., 1941, A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses, Bulletin of the Seismological Society of America, 31, 2.
11. 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 94-127, Menlo Park, California, United States Geological Survey.
12. Bozorgnia, Y., and Campbell K. W., 1995, Characteristics of free-field vertical ground motions during the Northridge earthquake, Earthquake Spectra, 11, 515-525.
13. Bozorgnia, Y., and Campbell K. W., 2004, The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified v/h and vertical design spectra, Journal of Earthquake Engineering, 8, 175-207.
14. Elgamal A., and He, L., 2004, Vertical earthquake ground motion records: an overview, Journal of Earthquake Engineering, 8, 663-697.
15. Housner, G. W., 1959, Behavior of Structures during Earthquakes, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 85, EM4, 104-111.
16. Newmark, N. M., Blume, J. A., and Kapur, K. K., 1973a, Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants, Journal of Power Division, ASCE, 99, 2, 287-303.
17. Newmark, N. M., and Hall, W. J., 1973b, Procedures and Criteria for Earthquake Resistant design, Building Research Series 46, Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, U. S. Department of Commerce.
18. 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.
19. Regulatory Guide 1.60, 1968, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Pans, USNRC.

김 준 경

1978년 서울대학교 자원공학과 학사
 1980년 서울대학교 자원공학과 석사
 1989년 미국 University of Arizona, 이학박사
 1989년 Dept of Geoscience 지구물리전문

Tel: 043-649-1319

E-mail: kjk-512@semyung.ac.kr

현재 세명대학교 공과대학 소방방재학과 교수

