

국내 관측자료를 이용한 수평 응답스펙트럼 특성 분석

김준경^{1)*}

Analysis of Characteristics of Horizontal Response Spectrum of Ground Motions from 19 Earthquakes

Jun-Kyoung Kim

Abstract The horizontal response spectra using the observed ground motions from the recent more than 19 macro earthquakes were analysed and then were compared to both the seismic design response spectra (Reg Guide 1.60), applied to the domestic nuclear power plants, and the Korean Standard Design Response Spectrum for general structures and buildings (1997). 130 horizontal ground motions, without considering soil types, were used for normalization with respect to the peak acceleration value of each ground motion. The results showed that response spectrum have strong dependency on epicentral distance. The results also showed that the horizontal response spectra revealed much higher values for frequency bands above 5 Hz than Reg. Guide (1.60). The results were also compared to the Korean Standard Response Spectrum for the 3 different soil types and showed that the vertical response spectra revealed much higher values for the frequency bands below 0.3 second than the Korean Standard Response Spectrum (SD soil condition). These spectral values dependent on frequency could be related to characteristics of the domestic crustal attenuation and the effect of each site amplification. However, through the qualitative improvements and quantitative enhancement of the observed ground motions, the conservation of horizontal seismic design response spectrum should be considered more significantly for the frequency bands above 5 Hz.

Key words Horizontal Response Spectrum, Reg. Guide 1.60, Korean Standard Design Response Spectrum

초 록 최근 발생한 19개의 중규모 지진으로부터 관측된 지반진동 파형을 이용하여 수평 응답스펙트럼을 분석하고 결과를 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준과 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다. 연구에 이용된 지반진동은 수평성분 130 개이며 고유진동수별 지반응답을 구하고 최대 지반 가속도 값을 이용하여 정규화 분석을 수행하였다. 연구결과에 의하면 진앙거리 의존성이 대단히 큼을 보여주었다. 또한 국내 원자력시설물의 내진기준으로 이용되고 있는 Reg. Guide 1.60과 비교한 결과 특히 약 5 Hz 이상의 높은 고유진동수 영역에서 Reg. Guide 1.60 보다 높은 값을 보여 주었다. 또한 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준인 표준 설계응답스펙트럼을 3개 지반조건에 적용한 결과를 분석 자료와 동시에 비교한 결과 약 0.3초 이하의 단주기 영역의 전체 대역(SD 지반조건)에서 수평 성분 자료처리 결과가 기준을 크게 초과하는 현상을 보여 주었다. 물론 이러한 현상은 국내 지각의 고유진동수별 감쇠 및 부지 직하부의 감쇠 특성 등과 복합적으로 관련되어 발생한 현상으로 판단된다. 향후 국내 지진활동 실정에 적합한 내진설계 기준 마련을 위해 관측자료의 질적 향상 및 양적인 축적 등을 통하여 특히 수평 성분의 약 5 Hz 이상의 고주파수 대역에서 수평응답스펙트럼 기준의 보수성을 심각하게 고려할 필요가 있다.

핵심어 수평응답스펙트럼, Reg. Guide 1.60, 표준 설계응답스펙트럼

1. 서론

설계지반운동의 특성은 일반적으로 응답스펙트럼으로 표현된다. 응답스펙트럼은 우리나라 고유의 지진지체구조 특성, 진앙거리에 따른 감쇠 특성 및 고유주기

¹⁾ 세명대학교 소방방재학과

* 교신저자 : kjk-512@semyung.ac.kr

접수일 : 2010년 10월 25일

심사 완료일 : 2010년 11월 25일

게재 확정일 : 2010년 11월 26일

등을 기초로 하고 있다. 그러나 해당 분야에 대한 연구가 충분하지 못해 1997년에 건설교통부에 의해 제시된 건축물 및 구조물을 위한 응답스펙트럼(건설교통부, 1997)을 약 10여 년 동안 개정없이 동일한 기준을 계속 채택하고 있다.

응답스펙트럼에 대한 연구는 Benioff(1934)에 의해 시작되어 Biot(1941)가 지진공학에 적용하였다. 또한, Housner(1959)가 본격적인 연구 및 응용을 시작하였고, 1959년에 발생한 강진의 수평성분을 이용하여 최초로 내진설계에 이용한 스펙트럼을 작성하였다. 또한 Housner(1959)는 4 개의 강진에서 기록된 8개 수평성분 지반진동 자료를 이용하여 내진설계를 위한 응답스펙트럼을 작성하였고, 이것이 내진설계에 이용된 최초의 스펙트럼이다. 이후 Newmark et. al.(1973a, 1973b, 1973c), Boore & Joyner(1994) 등에 의하여 활발하게 응답스펙트럼에 대한 연구가 수행되어 왔다. 국내에서 수행된 연구는 주로 원자력 분야와 관련하여 수행되어 왔으며 김준경(2003, 2005, 2009) 김준경 외(2010), 윤종구 외(2006)가 있다. 최근 한반도 주변의 지역에서 대규모 및 중규모 지진이 자주 발생하여 향후 내진설계 응답스펙트럼 분야에 대해 인식이 제고되고 있다.

특히 수직성분 응답스펙트럼에 대한 연구(Yang and Lee, 2007; Bozorgnia and Campbell, 1995)에서 현재 일반적으로 사용되어 오고 있는 스케일값과 다른 연구 결과들이 발표되고 있다. 일반적으로 사용되어 오고 있는 스케일 값은 관심 고유진동수 대역에서 일률적으로 수평성분 응답스펙트럼에 약 2/3의 값을 적용하여 수직성분 응답스펙트럼 사용하고 있다. 김준경(2010)은 국내 발생 지진자료를 이용한 수직성분 응답스펙트럼에 대한 연구에서 일부 고유진동수 구간에서 약 2/3의 값을 초과하는 현상을 제시하였다.

최근 연구결과에 의하면 여러 가지 인자가 응답스펙트럼의 특성에 영향을 미친다고 알려져 있지만, 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). 본 연구는 여러 가지 영향인자 가운데 수평 성분 응답스펙트럼의 특성에 영향을 미친다고 알려져 있는 여러 가지 인자 가운데 특히 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 구조물의 고유진동수 및 진앙거리에 의한 영향을 분석하였다. 최근 발생한 19개 중규모의 지진으로부터 관측된 지반진동을 이용하여 응답스펙트럼을 분석하였고 결과를 국내에서 가장 엄격하게 적용하고 있는 것으로 알려진 원자력시설물에 관한 내진설계 기준 뿐만 아니

라 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다.

2. 지반진동 자료

본 연구에서는 최근 발생한 중규모이상의 19개 지진으로부터 측정된 지반진동 자료를 고려하였고 이 중에서 잡음이 비교적 작은 지반진동만을 이용하였다. 특히 최근에 오대산지역에서 발생한 지진(2007)은 2004년 발생한 울진지진(규모 4.9) 이래로 최근 보기 드문 중규모에 해당하는 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 특성을 갖고 있다.

본 연구에서 사용한 지반진동의 지진발생 일자 및 관측된 지반진동의 해당 관측소는 Table 1에 제시되어 있다. 이 논문에서는 수평 성분 130개 자료를 처리하여 분석하였다. 또한 Fig. 1에서 진앙거리별 관측 지반진동 개수가 제시되어 있다. 자료타입은 가속도형식이며, 샘플링 간격은 1초당 100개이다. 또한 관측된 지반진동의 관측소의 지반특성은 국내의 연구결과가 아직 충분하지 못하여 고려하지 않았다. 향후 많은 연구가 필요한 분야이다.

최근 발생한 중규모이상의 지진으로부터 측정된 지반

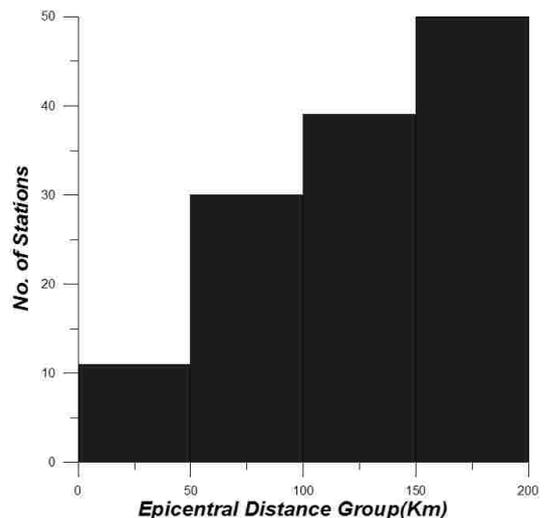


Fig. 1. Epicentral distribution of the ground motions for this study

Table 1. Earthquakes and ground motions for this study

Occurrence Date	ML	Station			
		(0~50 km)	(50~100 km)	(100~150 km)	(150~200 km)
2003/03/22	4.83				YGA, YGB
2003/03/30	4.60		BRD		
2003/04/15	3.24	HSB	NPR, TJN, HKU	YGB, SNU, KHD	KMC
2003/10/13	3.42	HSB	SNU, HKU, TJN		KMC, YGB, BRD
2004/01/05	3.33		BRD		KHD
2004/04/26	3.62	KMC, GKP1	GSU, WSC, TJN	HDB	SND, HSB, YGA, UJA
2004/05/29	5.08		UJA	WSC, WSA, HDB, SND	GKP1, KRB
2004/06/01	3.59			SND	HDB, GKP1
2004/08/05	3.21	KMC, NPR	TJN, HKU, JRB, HSB	YGA, GSU, GKP1	SNU, KRB, HDB, KRA, SND
2005/06/29	4.13		KRB	KRA, GSU, WSB, WSA, HDB	WSC, JRB, GKP1
2005/10/09	3.58	BRD		KHD	SNU
2006/01/19	3.53	SND	UJA	HKU, GKP1	KMC, TJN, SNU, HDB, WSB
2006/04/29	3.63	UJA	SND		HDB, WSA, WSC
2006/12/03	3.20		HKU, KMC, GKP1	NPR, SND, HSB, SNU, JRB, GSU, UJA	HDB, YGB, KHD
2007/01/20	4.55	JSB	SND	MGB	HKU, KHD, KMC, GKP1
2008/05/31	4.20		JJB	BGD	HWSB
2008/10/29	3.40	NPR	HSB, KMC	SNU, JRB, GKP1, YGB	GSU, SND, KHD
2009/03/02	3.40				KHD, HSB
2009/05/01	3.80		SND, GKP1, WSC, KMC	HDB, WSA, WSB, HKU, TJN, KRA	GSU, NPR, JRB, SNU, HSB
2009/08/21	3.80			KHD	SNU
Total	130	11	30	39	50

진동 자료를 이용하여 우선 푸리에 스펙트럼 등을 분석하였고, 분석 결과중에서 S/N비가 낮은 지반진동의 수평성분을 모두 제외하였다.

3. 지반진동 응답스펙트럼

일반적으로 지반진동에 대응하는 구조물의 응답스펙트럼은 지진 등에 의한 동적하중을 받는 탄성 단자유도계 구조물의 최대반응을 이용하여 표현된다. 일정한 범위내의 구조물의 고유 진동수 또는 고유 주기에 대해 구조물의 상대변위, 상대속도 및 절대가속도 등 3종류의 반응을 계산하고 최대반응을 각각에 대해 구할 수

있다. 유사 가속도 스펙트럼(PSA, Pseudo Spectrum of Acceleration)을 유도하는 과정은 김준경(2010)에 제시되어 있고 식 (1)과 같이 정의된다.

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

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 유사가속

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

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

도 스펙트럼, 유사변위 스펙트럼 및 유사속도 스펙트럼을 나타낸다.

4. 연구방법

입력 지반진동의 시간길이를 조절할 필요가 있고 이를 위해 본 연구에서는 지반진동의 지속시간 전체 구간을 입력하였다. 또한 응답스펙트럼을 계산할 때 주기 또는 고유진동수의 범위는 0.1 Hz부터 50 Hz까지 범위에서 0.1 Hz씩 증가시키면서 500개의 고유진동수 각각에 대해 반응을 계산하였다.

약 30 Hz이상의 고주파 영역의 지반진동은 일반적으로 빨리 감쇠할 뿐만 아니라 주요 구조물 전체에 심각한 구조적인 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 또한 본 분석 결과를 비교할 대상 중의 하나에 해당하는 국내 원자력시설물의 내진기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60에서도 약 33 Hz까지만 값이 제시되어 있다. 고유진동수 영역에 대한 여유를 감안하여 본 연구에서는 최대 고유진동수 50 Hz까지 응답을 계산하여 그 결과를 상호 비교하였다.

물론 구조물마다 다양한 고유주기를 갖고 있지만 대부분의 토목 및 건축 구조물의 경우 약 1 Hz에서 약 5 Hz의 범위에서 고유주기 조건을 가지고 있으므로 특히 이러한 고유진동수 대역에서 구조물의 응답 특성이 대단히 중요하다.

각 지진으로 관측된 지반진동 자료들은 측정거리, 지진규모, 지반조건 등의 다양한 인자들의 변화에 따라서 서로 다른 최대 지반가속도값을 가지고 있어, 지반진동을 분석하여 얻어진 각각의 응답스펙트럼들을 단순히 조항하여 통계적으로 처리하는 것은 의미가 없다. 따라서 동일한 최대 지반가속도에 대해 각각의 응답스펙트럼을 정규화한 후에 스펙트럼을 구하는 것이 일반적이다. 정규화하는 방법으로 최대 지반가속도, 유효 최대가속도(Effective Peak Acceleration), 및 스펙트럼 강도(Spectrum Intensity)을 이용하는 방법 등 3가지 종류로 분류하고 있으나 본 연구에서는 최대지반가속도에 의한 정규화 방법을 적용하였다.

Table 3. Seismic coefficient (Ca)

Soil Type	Seismic Province	
	1	2
SA	0.09	0.05
SB	0.11	0.07
SC	0.13	0.08
SD	0.16	0.11
SE	0.22	0.17

Table 4. Seismic coefficient (Cv)

Soil Type	Seismic Province	
	1	2
SA	0.09	0.05
SB	0.11	0.07
SC	0.18	0.11
SD	0.23	0.16
SE	0.37	0.23

5. 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 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60(Table 2) 및 국내 일반 구조물 및 건축물에 대한 내진설계기준(Table 3, 4 및 5)과 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.

진앙거리 범위에 따라 응답스펙트럼을 분석하였으며 진앙거리 그룹을 분류한 기준은 Yang and Lee(2007)가 제시한 연구결과를 참고하였고 0-50 km, 50-100 km, 10-150 km 및 150-200 km 등 4개 진앙거리 그룹으로 분류하였다. 약 200 km 이상의 범위에서 관측된 지반진동은 일반적으로 구조물에 대한 피해정도가 상대적

Table 5. Seismic hazard coefficient

Recurrence Period (year)	50	100	200	500	1,000	2,000
Hazard Coefficient	0.40	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

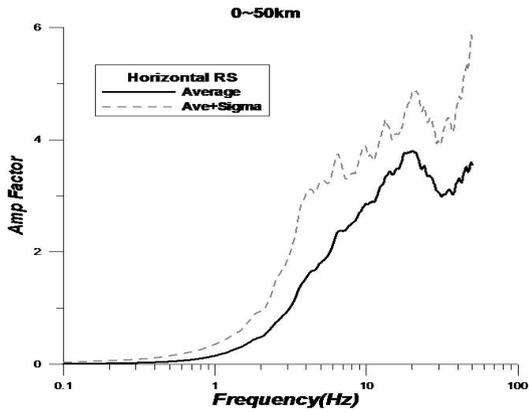


Fig. 2. Horizontal response spectrum with 0-50 km epicentral distance

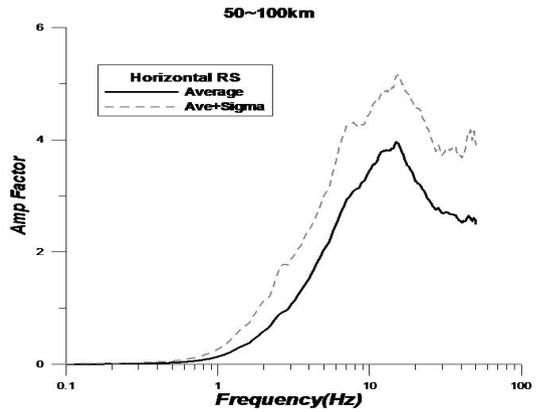


Fig. 3. Horizontal response spectrum with 50-100 km epicentral distance

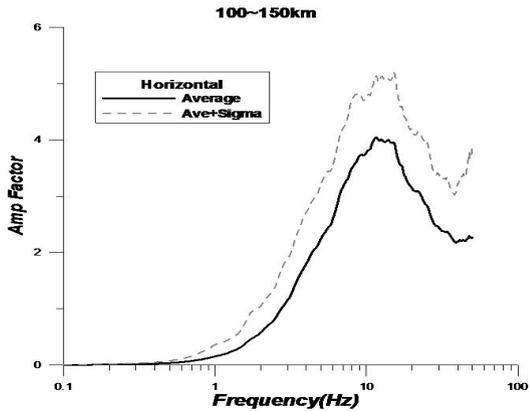


Fig. 4. Horizontal response spectrum with 100-150 km epicentral distance

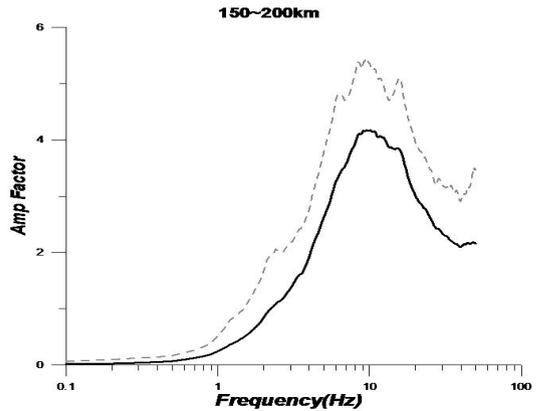


Fig. 5. Horizontal response spectrum with 150-200 km epicentral distance

으로 약하기 때문에 본 연구에서 제외하였다. 특히 국내의 최대잠재지진 규모의 크기 등을 고려하면 약 200 km 이상에서는 최대가속도값 등이 구조물에 심각한 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 수평 성분 지반진동을 처리하여 진앙거리별 수평 응답스펙트럼을 각각 구하였고 각각의 결과를 Fig. 2, 3, 4 및 5에 진앙거리가 증가하는 순서대로 제시하였다. 각각의 그림에서 가로 축은 구조물의 고유 진동수(단위 Hz)를 나타내고 세로 축은 정규화를 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 의미한다. 또한 각각의 그림은 각 고유 진동수에서 평균값

과 평균값에 표준편차를 더한 값을 동시에 나타내었다.

Fig. 2, 3, 4 및 5에서 증폭계수의 평균값을 고려할 때 최대값의 크기는 진앙거리에 관계없이 공통적으로 약 4의 값을 보여주고 4개 진앙거리 그룹 사이에 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. 하지만 진앙거리가 증가함에 따라 각 그룹의 최대 반응값에 해당하는 고유 진동수가 낮은 고유진동수 방향으로 점차적으로 이동하고 있음을 보여주고 있다. 이는 Bozorgnia and Campbell(2004) 및 Elgamal and He(2004) 등에 의한 연구결과가 제시한 바와 거의 유사한 특성을 보여주고 있다. 진앙거리가

증가할수록 높은 고유진동수 에너지는 감쇠정도가 상대적으로 빠르기 때문에 그 영향이 응답스펙트럼에 반영되고 있음을 보여주고 있다. 그리고 상대적으로 낮은 고유진동수 대역의 에너지는 감쇄현상에 의한 응답스펙트럼에 영향은 다소 있으나 진앙거리가 증가할수록 커다란 변화를 보여주지 않고 있다. 김준경 외(2010)가 제시한 수직성분 응답스펙트럼과 비교할 경우 수평 응답스펙트럼은 4 가지 진앙거리 범위 모두에서 상대적으로 보다 큰 응답값을 보여 주었다.

각각 고유진동수에서 정규화된 반응값을 진앙거리의 변화에 대해 분석하여 Fig. 6에 제시하였다. 50, 30, 10, 1, 0.5 및 0.1 Hz를 포함한 모두 6개 고유진동수에서 반응값을 분석하였다. 그림에서 가로축은 구조물의 고유진동수(단위 Hz)를 나타내고 세로축은 정규화를 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 의미한다.

50, 30, 10, Hz에서의 반응값은 1, 0.5 및 0.1 Hz에서의 반응값 보다 일반적으로 큰 값을 보여 주고 있다. 또한 50, 30, 10, Hz와 같이 높은 고유진동수에서의 반응값은 진앙거리 증가에 따라 점차 감소하고 있음을 보여 주고 있다. 이러한 특징은 앞서 Fig. 2, 3, 4 및 5에서 제시한 바와 일관성이 있으며 또한 Yang and Lee(2007) 및 Bozorgnia and Campbell(2004)이 제시한 연구결과와 잘 일치하고 있다. 이는 고유진동수가 높을수록 전파거리 증가에 따라 에너지가 상대적으로 보다 빠르게 감소하는 현상으로 설명이 가능하다.

1, 0.5 및 0.1 Hz와 같이 높은 고유진동수에서의 정규화된 반응값은 진앙거리 증가에 따라 커다란 변화가 없

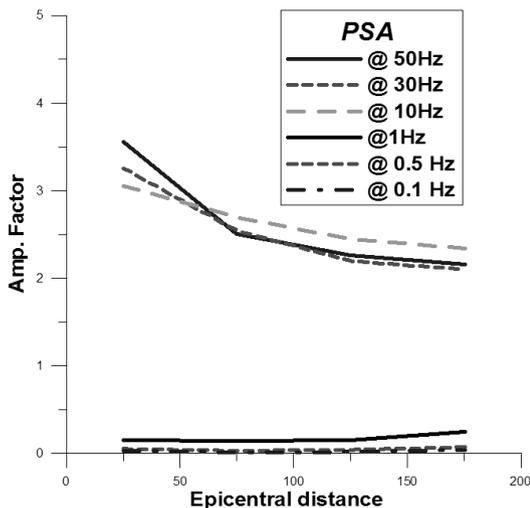


Fig. 6. PSA attenuation relationship with epicentral distance at 50, 30, 10, 1.0, 0.5 & 0.1 Hz

음을 보여주고 있다. 이는 고유진동수가 낮을 경우 진앙거리 약 200 km 내에서는 전파거리의 증가에 따라 에너지가 감소하기는 하나 높은 고유진동수의 에너지만큼 그렇게 빨리 감소하지 않거나 거의 변화가 없다는 것을 의미하는 것으로 분석된다.

진앙거리의 변화에 따르는 성분 응답스펙트럼 결과를 국내 원자력 내진설계기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60 기준의 수평성분 표준응답스펙트럼(Table 2)과 비교하여 Fig. 7에 제시하였다. 그림에서 가로축은 고유진동수를 나타내고 세로축은 정규화 된 반응값의 증폭계수를 나타낸다. 또한 본 연구에서 분석된 응답스펙트럼 결과값은 50 Hz까지, 또한 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준은 33 Hz까지 응답값이 Fig. 7 제시되어 있다.

Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 4개 진앙거리 그룹의 수평성분 응답스펙트럼은 앞서 제시한 바와 같이 진앙거리가 증가할수록 응답의 최대값의 위치가 왼쪽으로 즉 낮은 고유진동수 대역으로 이동하고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 4개 진앙거리 그룹의 수평성분 응답스펙트럼 모두에 대해 물론 진앙거리에 따라 차이가 있지만 적어도 약 5 Hz 보다 낮은 고유진동수 대역에서는 설계기준값 보다 작은 값을 유지하고 있어 내진설계 기준을 만족하고 있다. 하지만 약 5 Hz 보다 높은 고유진동수 대역에서는 4개 진앙거리 그룹의 관측 지진 자료를 처리한 결과 모두가 기존의 내진설계 기준값을

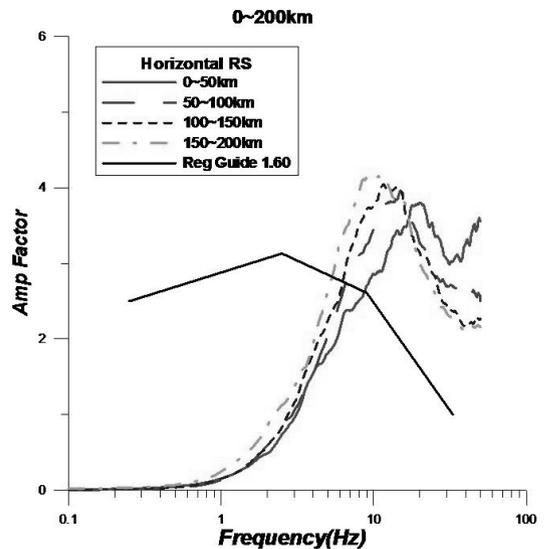


Fig. 7. Comparison of horizontal response spectrum between 0 - 200 km distance with US NRC Standard Response Spectrum.

큰 차이로 초과하고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 진앙거리가 작을수록 보다 높은 고유진동수 대역에서 내진설계 기준값을 초과하고 있고 보다 높은 고유진동수 대역까지 연장하여 초과하고 있음을 잘 보여주고 있다.

위에서 제시된 내진설계 기준값을 초과하는 현상은 물론 국내의 지진관측소 부지증폭 특성도 부분적으로 기여하는 것으로 판단된다. 특히 약 5 Hz 이상의 고유진동수 대역 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.

다음으로 4개 진앙거리 그룹의 수평성분 응답스펙트럼을 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼과 동시에 비교하였다(Fig. 8). Fig. 8에서 가로축은 일반건축물의 표준 응답스펙트럼과 비교를 쉽게 하기 위해 고유진동수를 대신하여 구조물의 고유주기를 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 적용하고 있다.

우선 Table 3 및 Table 4에 제시된 바와 같이 내진설계 대상지역의 지진구역(seismic province)과 5개 지반종류(soil type)에 적합한 각각 2가지 종류의 지진계수(Ca 및 Cv)를 선정하여야 한다. 이를 이용하여 표준 설

계 응답스펙트럼의 통제주기(Ts 및 To)를 선정한다. 마지막으로 Table 5에 제시된 건물의 중요도 및 사회적으로 요구되는 성능기준을 판단하여 재현주기(recurrence period)에 따른 지진위험도계수(seismic hazard coefficient)에 따라 값과 모양 특성을 다르게 정의하고 있다. Table 5에 나타나 있듯이 동일 지역 및 동일 지반조건일 경우 종합병원 및 재난시 거점 학교 등 주요 구조물 및 건축물의 기준인 약 2,400년 재현주기의 지진에 대비하기 위한 내진기준은 일반 구조물의 내진기준인 500년의 재현주기의 기준에 비해 전체 주기대역에서 약 2 배의 값으로 이루어져 있다.

Fig. 8에서 실선으로 이루어진 3개 응답은 가로축에 가까운 곡선으로부터 점차 멀어지는 순서대로 재래주기는 500년에 해당하고 지반조건 SC, SD 및 SE 조건에 대응하는 표준 설계응답스펙트럼이다. 예를들면 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 지반은 SD 조건에 해당하는 것이 많은 부분을 차지하고 있고 일부 SC 및 SE 조건의 지반으로 이루어져 있기 때문이다.

4개 진앙거리 그룹의 수평성분 응답스펙트럼은 SD 지반 조건의 기준과 비교할 때 0.2초 내지 0.3초 보다 짧은 단주기 즉 약 3.3 Hz 보다 높은 고유진동수 대역에서 4개 대역 응답스펙트럼 결과값 모두가 SD 조건 지반조건의 표준 설계 응답스펙트럼값을 초과하고 있다. 또한 진앙거리가 진원에 가까울수록 보다 단주기 대역에서 시작하고 그리고 보다 짧은 단주기 대역까지 연장되어 내진설계 기준값을 초과하고 있음을 잘 보여주고 있다. 따라서 내진설계 대상인 구조물로부터 가까이 잠재단층이 존재하는 경우 구조물의 단주기 즉 높은 고유진동수 영역의 보수성을 충분히 고려할 필요가 있다고 분석된다. 특히 양산단층으로부터 약 50 km 내의 거리에 존재하는 단주기에 민감한 구조물은 단주기의 보수성을 유의할 필요가 있다고 분석된다. 이는 앞서 제시된 국내 원자력 내진설계기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60 기준과 비교한 결과와 유사한 특징을 보여주고 있다.

6. 결론

최근 연구결과에 의하면 여러 가지 인자가 응답스펙트럼의 특성에 영향을 미친다고 알려져 있다. 특히 여러 가지 연구결과에 의하면 구조물의 고유진동수, 진앙거리, 부지의 지반 종류, 지진규모 및 지진원의 단층운

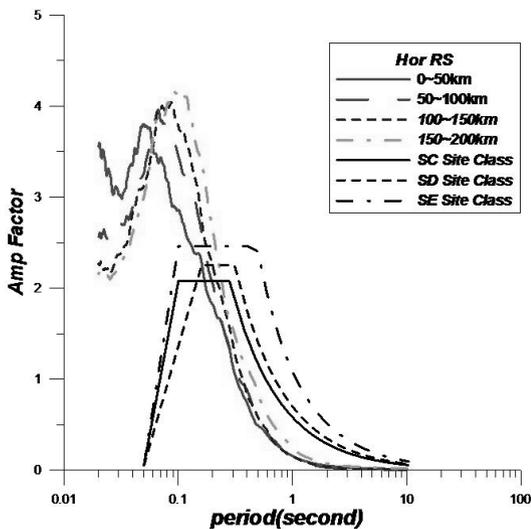


Fig. 8. Comparison of horizontal response spectrum between 0 - 200 km distance with UBC Standard Response Spectrum.

동 형태 등에 의해 영향이 크다고 발표되고 있다. 본 연구는 여러 가지 영향인자 가운데 수평 성분 응답스펙트럼의 특성에 특히 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 구조물의 고유 진동수 및 진앙거리에 의한 영향을 분석하였고 아래와 같이 요약하였다.

- 1) 국내에서 관측된 지반진동을 분석한 결과 수평성분 응답스펙트럼의 특성은 특히 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 진앙거리에 의한 영향이 뚜렷하게 존재하고 있음을 확인하였다.
- 2) 4개 진앙거리 그룹의 수평 성분 응답스펙트럼을 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼(SC, SD 및 SE 지반조건) 및 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60과 동시에 비교하였다. 국내에서 관측된 지반진동을 처리한 결과에 의한 초과 시작점의 진동수는 진앙거리 그룹마다 다소 차이가 있지만 약 5 Hz 이상에서 내진설계 기준값을 초과하고 있었다. 또한 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼과 비교한 결과 약 0.3 초 이하의 단주기에서 내진설계 기준값을 초과하고 있었다.
- 3) 진앙거리가 진원에 가까울수록 응답스펙트럼은 보다 높은 고유진동수 대역에서 2가지 종류의 내진설계 기준값을 초과하고 있다. 또한 보다 높은 고유진동수 대역까지 연장되어 초과하고 있음을 잘 보여주고 있다. 따라서 내진설계 대상인 구조물로부터 가까이 잠재단층이 존재하는 경우 구조물의 높은 고유진동수 영역의 보수성을 보다 심각하게 고려할 필요가 있다고 해석된다. 따라서 국내 원전시설을 포함한 라이프 라인 등 주요 구조물이 단층주변에 위치하고 있을 경우 높은 고유진동수 대역에서의 지진안전성을 보다 심도있게 고려할 필요가 있다고 해석된다.

국내에서 관측된 지진자료를 처리하여 분석된 응답스펙트럼의 값이 약 10 Hz 이상의 고고유진동수 대역에서 기준값 보다 초과하는 현상은 김준경(2003, 2005, 2009, 2010), 윤종구 외(2006), 선창국 외(2007) 및 김성균(2007) 등의 기존 연구에서도 관측소 부지의 증폭현상에 의한 일부 영향으로 지적되기도 하였다.

따라서 향후 지진데이터베이스를 질적 및 양적으로 보완 또는 확장과 정규화를 위한 방법을 다양화 하는 등 보다 다양하고 자세한 확인을 위한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 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, 2003, 국내 지진의 응답스펙트럼 특성 분석, 한국원자력안전연구원 연구보고서, 한국원자력안전기술원, 152p.
4. 김준경, 2005, 발파에 의한 지반진동의 응답스펙트럼 분석, 한국암반공학회, 338-343.
5. 김준경, 2009, 최근 발생지진 관측자료를 이용한 응답스펙트럼 분석, 한국암반공학회, 19, 490-497.
6. 김준경, 홍승민, 박기종, 2010, 국내 관측자료를 이용한 수직응답스펙트럼 특성 분석, 지구물리와 물리탐사, Vol. 13, No. 3, pp. 227-234.
7. 윤종구, 김동수, 방은석, 2006, 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 계산에 대한 연구(1), 국내 내진설계기준의 문제점, 한국지진공학회, 10(2), 39-50.
8. 선창국, 정충기, 김동수, 김재관, 2007, 역사지진 피해발생 읍성지역에 대한 부지고유의 지진응답 평가, 한국지질공학회, 17(1), 1-13.
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.
 20. Yang, J., and Lee C. M., Characteristics of vertical and horizontal ground motions recorded during the Niigata-ken Chuetsu, Japan Earthquake of 23 October 2004, Engineering Geology, 94, 50-64.



김 준 경

1978년 서울대학교 자원공학과 학사
 1980년 서울대학교 자원공학과 석사
 1989년 미국 University of Arizona, 이
 학박사
 1989년 Dept of Geoscience 지구물리
 전공
 Tel: 043-649-1319
 E-mail: kjk-512@semyung.ac.kr
 현재 세명대학교 공과대학 소방방재학
 과 교수
