

# 국내 관측자료를 이용한 응답스펙트럼의 수직/수평비 특성 분석

## Characteristics of Vertical/Horizontal Ratio of Response Spectrum from Domestic Ground Motions

김 준 경<sup>†</sup>

Kim, Junkyoung

**ABSTRACT :** The characteristics of vertical to horizontal ratio of response spectrum from 20 recent earthquakes were analysed. Response spectrum of 260 horizontal and 130 vertical ground motions were normalized by peak ground acceleration at each resonance frequency from 0.1 to 50Hz. It has been identified that the ratio of vertical to horizontal response spectrum has strong dependency on epicentral distance and resonance frequency. The ratio of vertical to horizontal response spectrum for the 0-50km epicentral distance group are larger than 2/3 values, which is a standard engineering rule-of-thumb  $V/H=2/3$ , at resonance frequency above 7-8Hz. All the 3 groups such as 50-100, 100-150- and 150-200km epicentral distance have shown larger values of vertical to horizontal ratio than 2/3 at resonance frequency above 15Hz and also are larger than 2/3 at resonance frequency below 8-10Hz. Even though there are differences in specific resonance frequency values which depend on the epicentral distance group, we should be careful of seismic design of vertical component of the structures which are located within the range of about 200km distance from the potentially seismic causative faults.

**Keywords :** Response spectrum, Korean Standard Design Response Spectrum, Ratio of vertical to horizontal response spectrum

**요 지 :** 최근 국내에서 발생한 20개의 중규모 지진으로부터 관측된 지반진동 파형을 이용하여 수직 대 수평 응답스펙트럼의 비율을 분석하였다. 연구에 이용된 지반진동은 수평성분 260개, 수직성분은 130개이며 고유진동수별 지반응답을 구하고 최대 지반 가속도 값을 이용하여 정규화 분석을 수행하였다. 국내에서 관측된 지반진동을 이용한 수직 대 수평성분 응답스펙트럼 비율의 특성은 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 진앙거리 및 고유진동수에 의한 영향이 뚜렷하게 존재하고 있음을 확인하였다. 0-50km 진앙거리 그룹의 수직 대 수평 응답스펙트럼 비율은 고유진동수 약 7-8Hz 이상 부터 2/3를 초과하고 있음을 보여주었다. 50-100km, 100-150km 및 150-200km의 진앙거리 그룹은 보다 높은 약 15Hz 이상부터 3 그룹 모두 2/3를 초과하고 있으며 또한 약 8-10Hz 보다 낮은 고유진동수에서 역시 2/3 이하로 떨어지지 않고 오히려 다시 초과하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 내진설계 대상인 구조물로부터 약 200km 이내 지진유발단층이 존재하는 경우 진앙거리마다 고유진동수값에 약한 차이가 존재하나 높은 및 낮은 고유진동수 영역에서 기존의 2/3값을 초과하기 때문에 수직성분의 보수성을 보다 심각하게 고려할 필요가 있다고 해석된다.

**주요어 :** 응답스펙트럼, Reg. Guide 1.60, 표준 설계응답스펙트럼

## 1. 서 론

설계지반운동의 특성은 일반적으로 응답스펙트럼으로 표현된다. 응답스펙트럼은 우리나라 고유의 지진지체구조 특성과 진앙거리에 따른 감쇠 특성 등을 기초로 하고 있다. 그러나 해당 분야에 대한 연구가 충분하지 못해 1997년에 건설교통부에 의해 제시된 건축물 및 구조물을 위한 응답스펙트럼(건설교통부, 1997)을 약 10 여년 동안 개정하지 않고 아직 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 등(1973a, 1973b, 1973c), Boore 등(1994) 등에 의하여 활발하게 응답스펙트럼에 대한 연구가 수행되어 왔다. 국내에서 수행된 연구는 주로 원자력 분야와 관련하여 수행되어 왔으며 김준경 외(2003, 2005, 2009, 2010), 윤종구 등(2006)이 있다. 최근 한반도 주변의 지역에서 대규모 및 중규모 지진이 자주 발생

<sup>†</sup> 정희원, 세명대학교 소방방재학과 교수(E-mail : kjk-512@semyung.ac.kr)

하여 향후 내진설계 응답스펙트럼 분야에 대해 인식이 제고되고 있다.

특히 수직성분 응답스펙트럼에 대한 연구(Yang 등, 2007; Bozorgnia 등, 1995)에서 현재 일반적으로 사용되어 오고 있는 스케일값과 다른 연구결과들이 발표되고 있다. 일반적으로 사용되어 오고 있는 스케일 값은 관심 고유진동수 대역에서 일률적으로 수평성분 응답스펙트럼에 약 2/3의 값을 적용하여 수직성분 응답스펙트럼을 사용하고 있다. 김준경(2010)은 국내 발생 지진자료를 이용한 수직성분 응답스펙트럼에 대한 연구에서 약 7Hz 보다 높은 고유진동수 구간에서 특히 높은 응답값을 보여주는 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 등, 2004; Elgamal 등, 2004). 본 연구에서는 최근 발생한 20개 중규모의 지진으로부터 관측된 지반진동을 이용하여 특히 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 구조물의 고유진동수 및 진앙거리에 의한 응답스펙트럼의 수직 대 수평 비율을 분석하였다.

## 2. 지반진동 자료

본 연구에서는 최근 발생한 중규모 이상의 20개 지진으로부터 측정된 지반진동 자료를 고려하였고 이중에서 잡음이 비교적 적은 지반진동만을 이용하였다. 특히 가장 최근 2007년 오대산지역에서 발생한 지진 및 2004년 발생한 울진지진(규모 4.9) 이래로 최근 보기 드문 중규모 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 지반진동의 지진발생 일자 및 관측된 지반진동의 해당 관측소는 표 1 및 그림 1에 제시되어 있다. 수평 성분 260개, 수직 성분 130개 모두 390개 지반진동 자료를 처리하여 분석하였다. 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 중규모 이상의 지진으로부터 측정된 지반진

표 1. 지진 발생일자, 규모, 진앙거리에 대한 관측소 목록

Occurrence Date	ML	Station			
		(0~50km)	(50~100km)	(100~150km)	(150~200km)
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

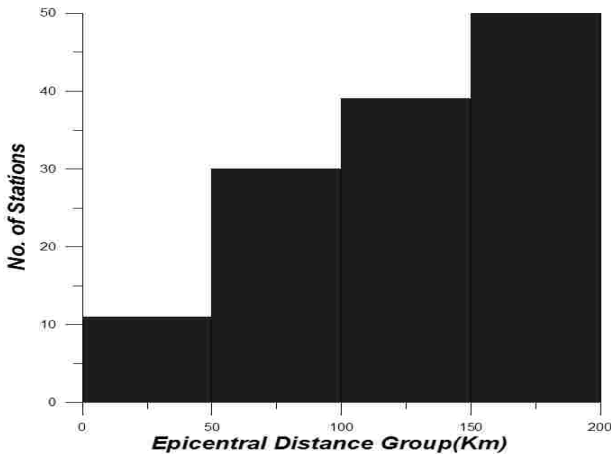


그림 1. 진앙거리 분포에 따른 지반진동분포

동 자료를 이용하여 우선 푸리에 스펙트럼 등을 분석하였고, 분석 결과 중에서 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 상대 변위, 상대속도 및 절대가속도 등 3종류의 반응을 계산하고 최대반응을 각각에 대해 구할 수 있다. 유사 가속도 스펙트럼(PSA, Pseudo Spectrum of Acceleration)를 유도하는 과정은 김준경(2010) 및 Newmark 등(1973a)에 제시되어 있고 식 (1)과 같이 정의된다.

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

여기서,  $u(t)$ 는 상대변위,  $\omega$ 는 고유진동수 (rad/sec),  $\zeta$ 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.

### 4. 연구방법

입력 지반진동의 시간길이를 조절할 필요가 있고 이를 위해 지반진동의 전체 지속시간을 입력하였다. 특히 수평성

분의 경우 동서 및 남북 방향의 응답스펙트럼을 계산하고 2개 수평성분의 제곱합의 제곱근을 적용하였다. 수직성분은 다른 과정없이 응답 값 자체를 적용하였다. 또한 응답스펙트럼을 계산할 때 주기 또는 고유진동수의 범위는 0.1Hz 부터 50Hz까지 범위에서 0.1Hz씩 증가시키면서 500개의 고유진동수 각각에 대해 반응을 계산하였다.

하지만 약 30Hz 이상의 고주파 영역의 지반진동은 일반적으로 빨리 감쇠할 뿐만 아니라 주요 구조물 전체에 심각한 구조적인 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 고유진동수 영역에 대한 여유를 감안하여 본 연구에서는 최대 고유진동수 50Hz까지 응답을 계산하여 그 결과를 상호 비교하였다.

관측된 지반진동 자료들은 측정거리, 지진규모, 지반조건 등의 다양한 인자들의 변화에 따라서 서로 다른 최대 지반가속도값을 가지고 있어, 지반진동을 분석하여 얻어진 각각의 응답스펙트럼들을 단순하게 조합하여 통계적으로 처리하는 것은 의미가 없다. 따라서 동일한 최대 지반가속도에 대해 각각의 응답스펙트럼을 정규화한 후에 스펙트럼을 구하는 것이 일반적이며 최대지반가속도에 의한 정규화를 하였다.

### 5. 연구 결과

일반적으로 건축 및 토목 구조물은 감쇠율이 3%에서 7%의 범위를 가지고 있고 이중에서 가장 일반적으로 비교되고 있는 5% 감쇠값에 해당하는 응답의 수직 대 수평 비율을 계산하였다. 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60(1973)과의 향후 비교를 위하여 가로축을 고유진동수로 나타내었다.

진앙거리 범위에 따라 응답스펙트럼을 분석하였으며 진앙거리 그룹을 분류한 기준은 Yang 등(2007)이 제시한 연구결과를 참고하여 0-50km, 50-100km, 100-150km 및 150-200km 등 4개 진앙거리 그룹으로 분류하였다. 약 200km를 초과하는 범위에서 관측된 지반진동은 일반적으로 구조물에 대한 피해정도가 상대적으로 약하기 때문에 본 연구에서 제외하였다. 특히 국내의 최대 잠재 지진 규모의 크기 등을 고려하면 약 200km 이상에서는 절대가속도값 등이 구조물에 심각한 영향을 미치지 않는다고 가정하였다.

동서 및 남북 2개 수평 성분 지반진동을 처리하여 진앙거리 그룹에 따라 수평 응답스펙트럼을 각각 구하였고 각각의 결과를 그림 2, 3, 4 및 5에 진앙거리가 증가하는 순서대로 제시하였다. 각각의 그림에서 가로축은 구조물의 고유 진동수(단위 Hz)를 나타내고 세로축은 정규화를 거친 응답스펙

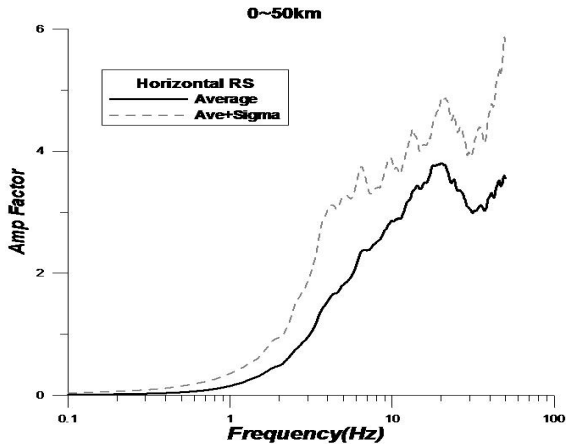


그림 2. 0-50km 진앙거리의 수평 응답스펙트럼

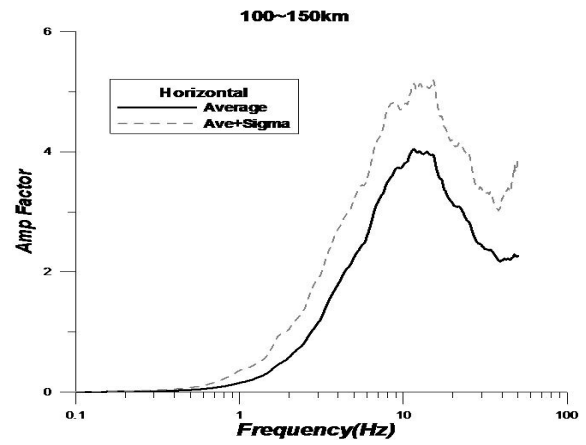


그림 4. 100-150km 진앙거리의 수평 응답스펙트럼

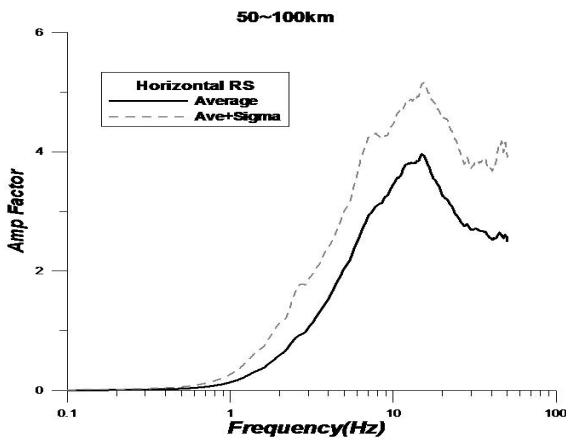


그림 3. 50-100km 진앙거리의 수평 응답스펙트럼

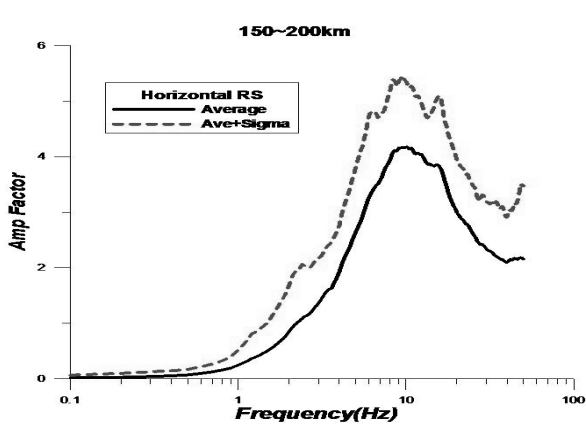


그림 5. 100-150km 진앙거리의 수평 응답스펙트럼

트럼의 증폭계수를 의미한다. 또한 각각의 그림은 각 고유진동수에서 평균값과 평균값에 표준편차를 더한 값을 동시에 나타내었다.

또한 그림 2, 3, 4 및 5에서 평균값을 비교할 때 최대값은 진앙거리에 따라 미세한 차이가 존재하지만 공통적으로 약 4의 값을 보여주고 4개 진앙거리 그룹 사이에 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. 하지만 진앙거리가 증가함에 따라 각 그룹의 최대 반응값에 해당하는 고유진동수가 낮은 고유진동수 방향으로 점차적으로 이동하고 있음을 보여주고 있다. 최대 반응값에 해당하는 고유진동수를 보다 구체적으로 제시하면 0-50km에서는 약 15-20Hz 사이, 50-100km에서는 약 10-15Hz 사이, 100-150km에서는 약 10Hz 부근 및 150-200km에서는 약 10Hz 이하의 값을 보여주고 있다. 이는 Bozorgnia 등(2004) 및 Elgarnal 등(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 약 1Hz 이하의 상대적으로 낮은 고유진동수 대역의 에너지는 감쇄현상에 의한 응답스펙트

럼에 영향은 다소 있으나 진앙거리가 증가할수록 커다란 변화를 보여주지 않고 있다.

그림 6, 7, 8 및 9에서는 수직성분 응답스펙트럼을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 4개 진앙거리 범위의 수직성분 응답스펙트럼은 진앙거리가 증가할수록 최대값의 위치가 왼쪽으로 즉 낮은 고유진동수 대역으로 이동하고 있음을 잘 보여주고 있다. 이러한 특징은 수평응답스펙트럼과 전체적으로 유사하다.

0-50km, 50-100km, 100-150km 및 150-200km 등 4개 진앙거리 그룹으로 분류하여 수직 대 수평 비율을 분석하여 그림 10에 제시하였다. 일반적으로 적용되고 있는 2/3값도 그림 10에 표시하였다. 그림에서 가로축은 구조물의 고유진동수(단위 Hz)를 나타내고 세로축은 응답스펙트럼의 수직 대 수평 비율을 의미한다.

4개 진앙거리 그룹에 대한 결과를 살펴보면 0-50km 진앙거리 그룹은 높은 고유진동수 대역에서 다른 3개 그룹 보다 가장 높은 값을 보여주고 있다. 그리고 약 7-8Hz 이하의 고유진동수 대역에서 2/3 아래로 떨어지고 있다. 또한 약 7-8Hz 이하의 낮은 고유진동수 대역에서 다른 3개 그룹에 비하여

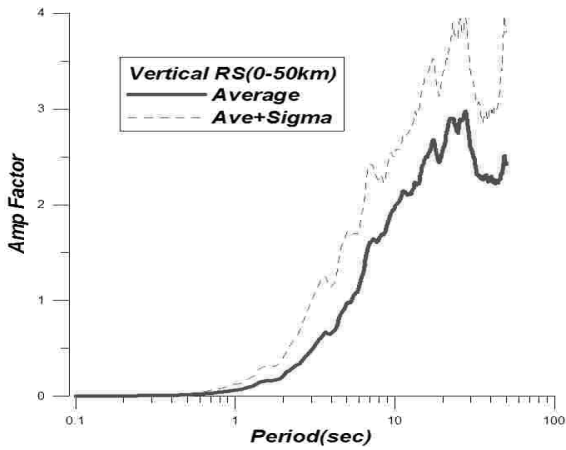


그림 6. 0-50km 진앙거리의 수직 응답스펙트럼

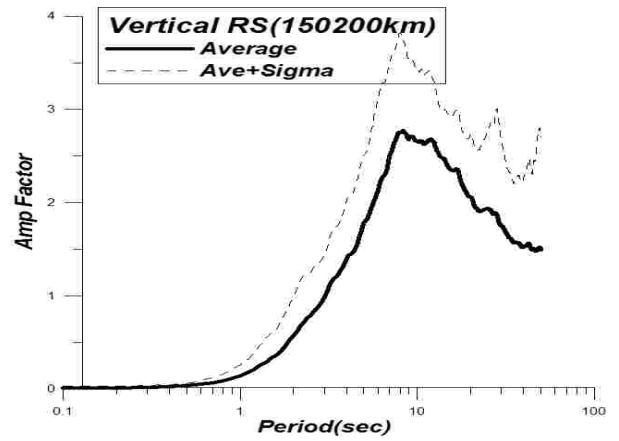


그림 9. 150-200km 진앙거리의 수직 응답스펙트럼

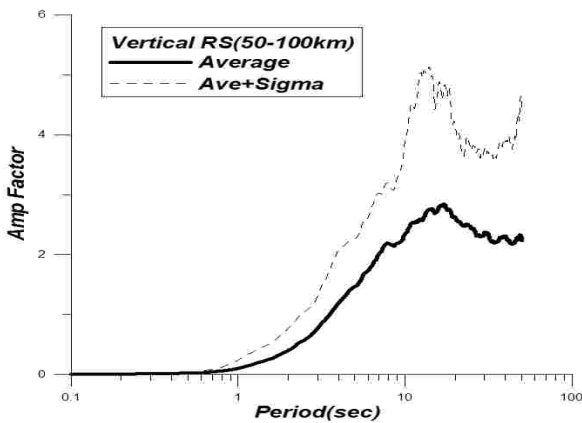


그림 7. 50-100km 진앙거리의 수직 응답스펙트럼

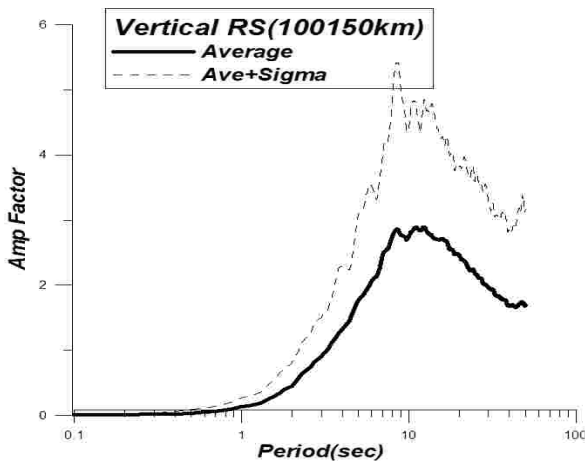


그림 8. 100-150km 진앙거리의 수직 응답스펙트럼

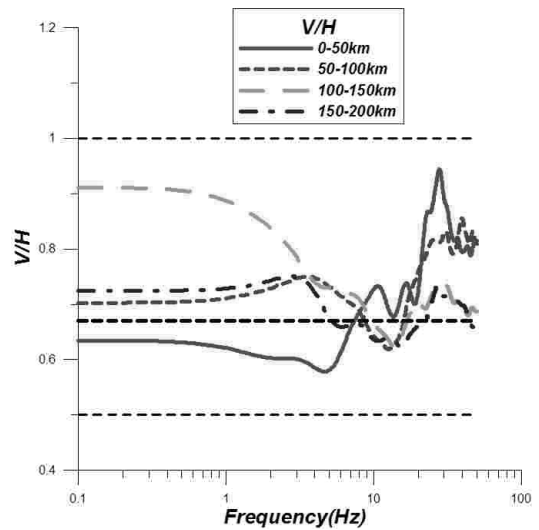


그림 10. 4개 진앙거리 그룹의 수직/수평 응답스펙트럼 비

가장 낮은 값을 보여 주고 있다. 진앙거리가 작아서 구조물이 진원에 가까울 경우 진원과 관측소간의 기하학적 현상으로 수평성분 보다 수직성분이 상대적으로 우세한 현상도 일부 기여하고 있는 것으로 판단된다.

50-100km, 10-150km 및 150-200km 의 진앙거리 그룹은 높은 고유진동수 대역에서 3그룹 모두 2/3를 초과하고 있으며 또한 진앙거리가 증가하는 그룹 순서대로 최고값이 차례

## 6. 결 론

최근에 여러 가지 인자가 응답스펙트럼의 특성에 영향을 미친다고 알려져 있다. 특히 최근 연구는 구조물의 고유 고유진동수, 진앙거리, 부지의 지반 종류, 지진규모 및 지진원의 단층운동 형태 등에 의해 영향이 크다고 발표되고 있다. 본 연구는 여러 가지 영향인자 가운데 응답스펙트럼의 비율

로 작은 값을 이루고 있음을 보여주고 있다. 중간 고유진동수 대역에서는 3그룹 모두 2/3 아래로 떨어지고 있다. 고유진동수가 더욱 낮을 경우 약 8-10Hz 이하에서 2/3 아래로 떨어지지 않고 오히려 다시 초과하고 있음을 보여주고 있다. 높은 고유진동수 대역에서 2/3를 초과하고 또한 낮은 고유진동수 대역에서 오히려 다시 초과하는 이러한 특징은 Yang 등 (2007)이 니이카다 지진(2004년 10월 23일)으로부터 발생한 지반진동의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

의 특성에 특히 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 구조물의 고유 진동수 및 진앙거리에 의한 영향을 분석하였고 다음과 같이 요약하였다.

- (1) 국내에서 관측된 지반진동을 이용한 응답스펙트럼의 수직 대 수평성분 비율 특성은 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 진앙거리 및 고유진동수에 의한 영향이 뚜렷하게 존재하고 있음을 확인하였다.
- (2) 0-50km 진앙거리의 그룹 수직 대 수평 비율은 약 7-8Hz 이상 부터 2/3를 초과하고 있음을 보여주었다. 따라서 가까운 진앙거리에서는 높은 고유진동수 대역에서 스펙트럼의 수직 대 수평 비율이 2/3값을 초과하고 있으므로 국내에서 수직성분의 내진설계 시 유의할 필요가 있다는 것을 의미한다.
- (3) 50-100km, 100-150km 및 150-200km의 진앙거리 그룹은 보다 높은 15Hz 이상 부터 3그룹 모두 2/3를 초과하고 있으며 또한 약 8-10Hz 보다 낮은 고유진동수에서 역시 2/3 이하로 떨어지지 않고 오히려 다시 초과하고 있음을 보여주고 있다. 높은 고유진동수 대역에서 2/3를 초과하고 또한 낮은 고유진동수 대역에서 오히려 다시 초과하는 특징은 Yang 등(2007) 및 Bozorgnia 등(2004)이 한반도 외부에서 관측된 지반진동을 이용하여 제시한 선행 연구결과와 잘 일치하고 있다.
- (4) 내진설계 대상인 구조물로부터 약 200km 이내 잠재단층이 존재하는 경우 구조물의 진앙거리 그룹마다 2/3를 초과하는 고유진동수 값에 약간의 차이가 존재하나 높은 및 낮은 고유진동수 영역에서 수직성분의 보수성을 보다 심각하게 고려할 필요가 있다고 해석된다. 그러므로 국내 원전시설을 포함한 라이프라인 등 주요 구조물이 단층주변에 위치하고 있을 경우 각각의 고유진동수 대역에서의 수직성분의 내진설계 보수성을 보다 심도 있게 고려할 필요가 있다고 해석된다.
- (5) 국내에서 관측된 지진자료를 처리하여 분석된 수평성분 응답스펙트럼의 값이 약 10Hz 이상의 높은 고유진동수 대역에서 기준값 보다 초과하는 현상은 김준경(2003, 2005, 2009, 2010), 윤종구 등(2006), 선창국 등(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 다양화하는 등 보다 폭넓은 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2010년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술훈발사업(CARTER 2007 -5109)”에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 건설교통부(1997), *내진설계기준개발 2단계 연구* 연구보고서, 1997-13, 한국지진공학회, pp. 125~128.
2. 김준경(2003), *국내 지진의 응답스펙트럼 특성 분석*, 한국원자력안전연구원 연구보고서, 한국원자력안전기술원, pp. 152.
3. 김준경(2005), 발파에 의한 지반진동의 응답스펙트럼 분석, *터널과 지하공간*, Vol. 15, No. 5, pp. 338~343.
4. 김성균(2007), 한반도 지진특성을 고려하여 모사된 강진동에 대한 가속도 응답스펙트럼, *한국지구과학회지*, Vol. 28, No. 2, pp. 179~186.
5. 김준경(2009), 최근 발생지진 관측자료를 이용한 응답스펙트럼 분석, *터널과 지하공간*, Vol. 19, No. 6, pp. 490~497.
6. 김준경, 홍승민, 박기종(2010), 국내 관측자료를 이용한 수직응답스펙트럼 특성 분석, *지구물리와 물리탐사*, Vol. 13, No. 3, pp. 227~234.
7. 선창국, 정충기, 김동수, 김재관(2007), 역사지진 피해발생 음성지역에 재한 부지고유의 지진응답 평가, *한국지질공학회지*, Vol. 17, No. 1, pp. 1~13.
8. 윤종구, 김동수, 방은석(2006), 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 계산에 대한 연구(I), *국내 내진설계기준의 문제점*, *한국지진공학회논문집*, Vol. 10, No. 2, pp. 39~50.
9. Benioff, H.(1934), The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness of the Seismological Society of America, Vol. 24, No. 2, pp. 88~97.
10. Biot, J. A.(1941), A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 31, No. 2, pp. 145-161.
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, pp. 25-30.
12. Bozorgnia, Y., and Campbell K. W.(1995), Characteristics of Free-field Vertical Ground Motions during the Northridge Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No. 4, pp. 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*, Vol. 8, No. 2, pp. 175~207.
14. Elgamal, A. and He, L.(2004), Vertical Earthquake Ground Motion Records: an Overview, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 663~697.
15. Housner, G. W.(1959), Behavior of Structures during Earthquakes, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 85(EM4.), pp. 104~111.
16. Newmark, N. M., Blume, J. A., and Kapur, K. K.(1973), Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants, *Journal of Power*

- Division*, ASCE, Vol. 99, No. 2, pp. 287~303.
17. Newmark, N. M. and Hall, W. J.(1973), *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, pp. 120~125.
  18. Newmark, N. M., Hall, W. J., and Mohraz, B.(1973), *A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra*, Report WASH-1255, Directorate of Licensing, U. S. Atomic Energy Commission, pp. 28~48.
  19. Regulatory Guide 1.60(1973), *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Pans*, USNRC, pp. 1~15.
  20. Yang, J. and Lee C., M.(2004), Characteristics of Vertical and Horizontal Ground Motions Recorded during the Niigata-ken Chuetsu, Japan Earthquake of 23 October 2004, *Engineering Geology*, Vol. 94, No. 1-2, pp. 50~64.

(접수일: 2010. 11. 9 심사일: 2010. 12. 8 심사완료일: 2010. 12. 20)