

## 최근 발생지진 관측자료를 이용한 응답스펙트럼 분석

김준경\*

### Analysis of Response Spectrum of Ground Motions from Recent Earthquakes

Jun-Kyoung Kim

**Abstract** The horizontal and vertical response spectra using the observed ground motion from the recent 5 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). 74 horizontal and 89 vertical observed 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 the horizontal MPOSD(Mean Plus One Sigma Standard Deviation) response spectra revealed much higher values for the whole frequency bands above 1 Hz than Reg. Guide(1.60). For the vertical response spectra, the results showed slightly higher than just between 7 and 8 Hz frequency band. The results were also compared to the Korean Standard Response Spectrum for the 3 different soil types and showed that the horizontal MPOSD response spectra revealed much higher values for the whole periods below 2 second(0.5 Hz) than those of SE soil type. The vertical response spectra showed similar to the values of the Korean Standard Response Spectrum of SD soil type. 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 whole frequency bands above the 1 Hz.

**Key words** Response spectrum, Reg. Guide 1.60, MPOSD, Korean Standard Design Response Spectrum.

**초 록** 최근 발생한 5개의 중규모 지진으로부터 관측된 지반진동 파형을 이용하여 응답스펙트럼을 분석하고 결과를 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준과 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다. 연구에 이용된 지반진동 개수는 수평성분 및 수직성분 각각 74개 및 89개이며 주파수별 지반응답을 구하고 최대 지반 가속도 값을 이용하여 정규화 분석을 수행하였다. 본 연구결과를 국내 원자력시설물의 내진기준으로 이용되고 있는 Reg. Guide 1.60과 비교한 결과 특히 약 1 Hz 이상의 전체 고주파수 영역에서 수평 성분 스펙트럼이 Reg. Guide 1.60 보다 높은 값을 보여 주었다. 수직성분은 약 7~8 Hz 부근에서 약간 초과하였다. 또한 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준인 표준 설계응답스펙트럼을 3개 지반조건에 적용한 결과를 분석 자료와 동시에 비교한 결과 특히 약 2초(0.5 Hz) 이하의 단주기 영역의 전체 대역(SE 지반조건)에서 수평 성분 자료처리 결과가 기준을 크게 초과하는 현상을 보여 주었다. 수직성분은 전체 주기 영역에서 SD 지반조건 기준과 유사한 특징을 보여 주었다. 물론 이러한 현상은 국내 지각의 주파수별 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 1 Hz 이상의 고주파수 대역에서 응답스펙트럼 기준의 보수성을 심각하게 고려할 필요가 있다.

**핵심어** 응답스펙트럼, Reg. Guide 1.60, MPOSD, 한국 표준 설계응답스펙트럼

<sup>1)</sup> 세명대학교 소방방재학과 교수

\* 교신저자 : kjk-512@semyung.ac.kr

접수일 : 2009년 11월 3일

심사 완료일 : 2009년 11월 27일

게재 확정일 : 2009년 12월 1일

## 1. 서론

국내 도로교의 내진설계는 1992년에 개정된 AASHITO의 내진설계 기준의 개념을 준용하고 있다. 그러나 이

러한 내진설계 개념이 미국지역에서 사용하고 있는 내진기준을 원용하고 있기 때문에 각 종류의 구조물 상호간에 통합되고 일관성 있는 내진설계 개념이 결여되어 있다. 이에 건설교통부는 1997년에 한국지진공학회가 제안한 상위 및 하위 개념기준으로 구성된 이원화된 내진설계 개념을 기준으로 제시하였다. 상위개념의 성능기준은 NEHRP(1997) 가이드라인의 일반설계기준과 매우 유사하게 각각의 구조물이 발휘하여야 할 내진성능을 규정하고 있다.

설계지반운동의 특성은 일반적으로 응답스펙트럼으로 표현한다. 응답스펙트럼은 우리나라 고유의 지진체제구조 특성과 지체구조구별 지진발생 특성을 기초로 하고 있다. 그러나 현 단계에서는 해당 분야에 대한 연구가 충분하지 못해 1997년에 건설교통부에 의해 제시된 응답스펙트럼을 채택하고 있다.

따라서 최근 발생한 5개의 중규모의 지진으로부터 관측된 지반진동을 이용하여 응답스펙트럼을 분석하였고 이를 국내에서 가장 엄격하게 적용하고 있는 것으로 알려진 원자력시설물에 관한 내진설계 기준 및 국내 일반구조물 및 건축물 내진설계기준인 표준 설계응답스펙트럼과 각각 비교하였다.

응답스펙트럼에 대한 연구는 Benioff(1934)에 의해 시작되어 Biot(1941)가 지진공학에 적용하였으며, Housner(1959)가 본격적인 연구 및 응용을 시작해 1959년에 발생한 강진의 수평성분을 이용하여 최초로 내진설계에 이용한 스펙트럼을 작성하였다. 또한 Housner(1959)는 4건의 강진에서 기록된 8개 수평성분 기록자료를 이용하여 스펙트럼을 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), 윤종구 외(2006)이 있고 최근 국내의 지역에서 대규모 및 중규모 지진이 자주 발생하여 향후 이 분야에 대해 인식이 제고되어 많은 연구가 수행될 예정이다.

## 2. 지반진동 응답스펙트럼 지배방정식

일반적으로 지반진동을 이용한 응답스펙트럼은 지진 등에 의한 동적하중을 받는 탄성 단자유도계 구조물의 최대반응을 나타낸다. 일정한 범위내의 구조물의 고유진동수 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.

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

여기서,  $u(t)$ 는 상대변위,  $\omega$ 는 고유진동수(rad/sec),  $\omega$ 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( $u_0 = u(0), v_0 = \dot{u}(0)$ ) 및 여러 가지 필요한 가정을 적용하면 유사 속도응답스펙트럼 및 유사 가속도 스펙트럼은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

일반적으로 건축 및 토목 구조물의 감쇠율은 3% - 7% 정도로서 비교적 작은 값이다. 따라서 근사적으로는  $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1$ 이고,  $\omega_d = \omega\sqrt{1-\zeta^2}$ 에 의해  $\omega_d \approx \omega$ 로 보고 위상각  $\theta$ 를 무시할 경우에 얻어지는 결과는 속도 반 응답스펙트럼(SV, Spectrum of Velocity)과 유사한 값이 된다. 이것을 유사 속도응답스펙트럼(PSV, Pseudo Spectrum of Velocity)이라 하며 다음과 같이 정의할 수 있다(이희현 외, 1996).

$$\begin{aligned} PS_V(\zeta, \omega) &= \left| \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta\omega(t-\tau)] \sin\omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ PS_D(\zeta, \omega) &= \left| \frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta\omega(t-\tau)] \sin\omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ &= \frac{1}{\omega} PS_V(\zeta, \omega) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\zeta$  값이 작은 경우에  $2\zeta\omega\dot{u}(t)$  항은 무시될 수 있으므로 유사 가속도 스펙트럼(PA, Pseudo Spectrum of Acceleration)은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} PS_A(\zeta, \omega) &= \left| \ddot{x}(t) \right|_{\max} \\ &= \left| [-2\zeta\omega\dot{u}(t) - \omega^2u(t)] \right|_{\max} \\ &= \left| \omega^2u(t) \right|_{\max} \\ &= \omega^2 PS_D(\zeta, \omega) \\ &= \omega PS_V(\zeta, \omega) \end{aligned} \quad (3)$$

## 3. 지반진동 자료

본 연구에서는 최근 발생한 중규모이상의 지진 5개로부터 측정된 지반진동자료를 이용하였다. 특히 가장 최근에 발생한(2007) 오대산지역의 지진은 2004년 발생한 울진지진(규모 4.9) 이래로 최근 근래에 보기 드문 중규모 지진이다. 또한 오대산지진은 제주도 일부 지역

을 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 진앙 및 관측소 위치는 Fig. 1에 제시되었으며 목록은 Table 1에 제시되어 있다. Table 1에 의하면 사용된 관측자료의 개수는 수평 및 수직 성분 각각 74 및 89개로 모두 163개의 자료를 처리하여 분석하였다. 자료타입은 가속도형식이며, 샘플링 간격은 1초당 100개이다. 또한 관측된 지반진동의 관측소의 지반특성은 국내의 연구결과가 아직 충분하지 못하여 고려하지 않았다.

최근 발생한 중규모이상의 지진 5개로부터 측정된 지반진동자료를 이용하여 우선 푸리에 스펙트럼을 분석하였고, 분석 결과중에서 고주파영역에서의 값이 감소하지 않고 계속적으로 증가하는 현상을 보이는 지반진동의 수평 및 수직성분을 모두 제외하였다. 1개 수평성분 응답스펙트럼을 계산하기 위하여 NS 및 EW 성분 모두가 존재해야 하지만 수직 성분 응답스펙트럼을 분석하기 위하여 수직성분만 필요하므로 수평 및 수직성분 지반진동의 개수는 서로 상이하다.

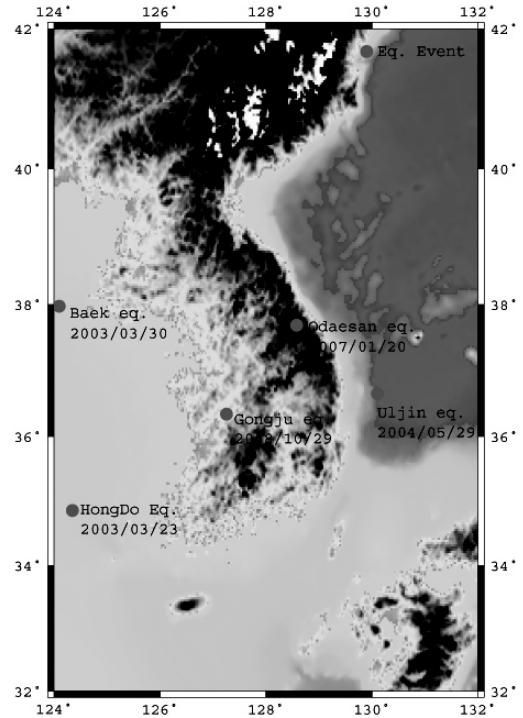


Fig. 1. Location map of epicenters of 5 Recent Earthquakes

Table 1. List of Seismic Stations and Earthquakes

EVENT NO	Date	Lat	Log	Depth (km)	ML	Seismic Station	
						Hor	Ver
1 (홍도)	2003/03/23	34.8607	124.3507	9.6	5.1	Hor (10)	BRD,GSU,HKU,HSB,KHD,KMC,NPR,SND,SNU,TJN
						Ver (18)	BRD,GKP1,GSU,HKU,HSB,KHD,KMC,NPR,SND,SNU,TJN,KRA,KRB,WSA,WSB,WSC,YGA,YGB
2 (백령도)	2003/03/30	37.9760	123.7992	4.51	4.8	Hor (11)	BGD,BRD,GSU,HKU,HSB,KHD,KMC,NPR,SND,SNU,TJN
						Ver (20)	BGD,BRD,GKP1,GSU,HKU,HSB,KHD,KMC,NPR,SND,SNU,TJN,KRA,KRB,UJA,WSA,WSB,WSC,YGA,YGB
3 (울진)	2004/05/29	36.6572	130.1047	3.7	5.1	Hor (19)	BGD,BRD,GKP1,GSU,HDB,HKU,HSB,JRB,KMC,KRA,KRB,NPR,SND,SNU,TJN,UJA,WSA,WSC,YGA
						Ver (19)	BGD,BRD,GKP1,GSU,HDB,HKU,HSB,JRB,KMC,NPR,SND,SNU,TJN,KRA,KRB,UJA,WSA,WSC,YGA
4 (오대산)	2007/01/20	37.6889	128.5841	13.1	4.9	Hor (16)	BGD,BRD,GKP1,GSU,HDB,HKU,HSB,JRB,JSB,KHD,KMC,MGB,NPR,SND,TJN,YKB
						Ver (15)	BGD,BRD,GKP1,GSU,HDB,HKU,HSB,JRB,KHD,KMC,MGB,NPR,SND,TJN,YKB
5 (공주)	2008/10/29	36.3454	127.2586	5.7	3.6	Hor (18)	BGD,GKP1,GSU,HDB,HSB,HWSB,JJB,JRB,JSB,KHD,KMC,KSA,NPR,SND,SNU,YGA,YGB,YKB
						Ver (17)	BGD,GKP1,GSU,HDB,HSB,HWSB,JJB,JRB,JSB,KHD,KMC,KSA,NPR,SND,SNU,YGB,YKB

## 4. 연구방법

### 4.1 응답스펙트럼 계산

Analyst program을 이용하여 응답스펙트럼 값을 분석하였다. 입력 지반진동의 시간길이를 조절할 필요가 있고 이를 위해 본 연구에서는 지반진동의 전체 지속시간을 10.24초 이상으로 설정하였다. 또한 실제 응답스펙트럼을 계산할 때 주기 또는 주파수의 범위는 0.1 Hz부터 50 Hz까지 범위에서 0.1 Hz씩 증가시키면서 약 500개의 주파수 각각에 대해 계산하였다.

하지만 약 30 Hz이상의 고주파 영역의 지반진동은 일반적으로 빨리 감쇠할 뿐만 아니라 주요 구조물 전체에 심각한 구조적인 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 또한 비교대상인 국내 원자력시설물의 내진기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60에서도 약 33 Hz까지만 값이 제시되어 있다. 하지만 주파수 영역에 대한 여유를 감안하여 본 연구에서는 최대 주파수 50 Hz까지 분석하여 결과를 상호 비교하였다.

물론 구조물마다 다양하지만 일반적으로 대부분의 토목 및 건축 구조물의 경우 약 1 Hz에서 5 Hz의 범위에서 고유주기 조건을 가지고 있으므로 특히 이러한 주파수 대역에서 구조물의 응답이 대단히 중요하다.

### 4.2 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 각각의 응답스펙트럼을 정규화한 후에 스펙트럼을 구하는 것이 일반적이다. 정규화하는 방법으로 최대 지반가속도, 유효 최대가속도(Effective Peak Acceleration), 및 스펙트럼 강도(Spectral Intensity) 을 이용하는 방법 등 3가지 종류로 분류하고 있으나 본 연구에서는 최대 지반가속도에 의한 정규화 방법을 적용하였다.

또한 최대 지반가속도에 의한 정규화 과정을 적용하는 방법도 세 가지 종류의 방법으로 분류하고 있다. 우선, 각 지진자료의 최대 지반가속도가 동일한 값이 되도록 지진자료를 비례적으로 조정하거나, 두 번째 방법으로 각 지진자료에 대한 응답스펙트럼을 구한 후, 동일한 최대가속도에 대한 응답스펙트럼이 되도록 스펙트럼 값을 비례적으로 조정하는 방법이 있다. 마지막으로, 각 지진자료에 대한 응답스펙트럼을 구할 때, 그 단위를 각각의 지진자료의 최대 지반가속도에 대한 배율을 이용하는 방법이 있다. 위에서 서술한 방법 중에서 세 번째 방법이 가장 널리 적용되고 있고 본 연구에서도 정규화 과정을 위해 세 번째 방법을 적용하였다.

## 5. 연구 결과

관측된 지반진동 자료를 이용하여 일반적으로 건축 및 토목 구조물의 감쇠율은 3% 에서 7% 의 범위를 가지고 있기 때문에 가장 공통적으로 적용되고 있는 5% 감쇠값에 대해 계산하였다. 결과를 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.

**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

**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

**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

Reg. Guide 1.60은 국내 일반 구조물 및 건축물에 대한 내진설계기준과는 달리 수평 및 수직 성분에 대해 분리하여 기준을 각각 제시하고 있다.

수평 및 수직 성분 응답스펙트럼 결과를 각각의 Reg. Guide 1.60 기준과 비교한 결과를 위해 Fig. 2 및 3에서 각각 제시하였다. 그림에서 가로축은 주파수를 나타내고 세로축은 배율을 나타낸다. 또한 Fig. 2, 3에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 분석된 응답스펙트럼 결과 값은 50 Hz까지, 또한 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준은 33 Hz까지 응답값이 제시되어 있다.

Fig. 2는 EW 성분 및 NS 성분 모두를 고려한 수평성분에 대해 분석된 결과로서 평균값에 표준편차를 더한 값(MPOSD; Mean Plus One Standard Deviation)을 Reg. Guide 1.60(Table 2)에서 제시하고 있는 값과 비교하였다. 또한 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60은 보수성을 확보하기 위해 평균값에 표준편차를 더한 값이기 때문에 본 연구에서 평균값에 표준편차를 더한 값을 내진설계 기준값과 비교하는 것이 타당하다고 판단된다.

Fig. 2에서 알 수 있는 바와같이 EW 성분 및 NS 성분을 동시에 고려하여 표준편차를 더하여 얻어진 수평 성분 응답스펙트럼은 약 1 - 2 Hz 보다 낮은 주파수 대역에서는 설계기준값 보다 아래의 수준을 유지하고 있어 내진설계 기준을 만족하고 있다. 하지만 약 1 - 2 Hz 보다 높은 주파수 대역에서는 대역 전체에서 관측 지진 자료를 처리한 결과가 기존의 내진설계 기준값을 큰 차이로 초과하고 있음을 잘 보여주고 있다.

Fig. 3은 수직성분 응답스펙트럼에 대해 비교한 결과를 보여주고 있다. 표준편차가 더해진 수직 응답스펙트럼은 약 7 Hz와 9 Hz 사이에서 내진설계 기준값을 부분적으로 약하게 초과하고 있고 이후 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역 전체에서 설계기준값을 만족하고 있다. 약 30 Hz 이상의 주파수 대역에서는 일부 초과하는 현상을 보여주고 있으나 일반 구조물 혹은 건축물의 고유주파수 대역과는 거리가 있다.

따라서 기준을 초과하는 주파수 대역과 초과 수준 등의 특징은 수평 및 수직 응답스펙트럼에서 커다란 차이를 보여주고 있다. 수평성분은 약 2 Hz 이상의 대역에서 현재 적용중인 내진설계 기준의 보수성에 문제가 있고 내진설계 기준을 보다 크게 강화할 필요가 있다.

위에서 제시된 초과특징 중에서 본 연구결과가 내진설계 기준값을 초과하는 현상은 국내의 지진관측소 부지증폭 특성이 부분적으로 기여하는 것으로 판단된다. 특히 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역 전체에서 기준값을 초과하고 있는 현상은 원자력 산업계에서도 계속 지적되어 왔을 뿐만 아니라 윤종구 외(2006) 및 선창국 외(2007)의 연구에서도 유사한 문제점이 제시되었다.

EW 성분 및 NS 성분을 고려하고 표준편차를 더하여 얻어진 수평 성분 응답스펙트럼과 수직성분 응답스펙트럼 분석결과를 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼과 동시에 비교하였다(Fig. 4). 그림에서 가로축은 주파수가 아니고 구조물의 고유주기를 나타내고 세로축은 배율을 나타낸다. 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준은 원자력시설물의 내진설계 기준과는 달리 수평 및 수

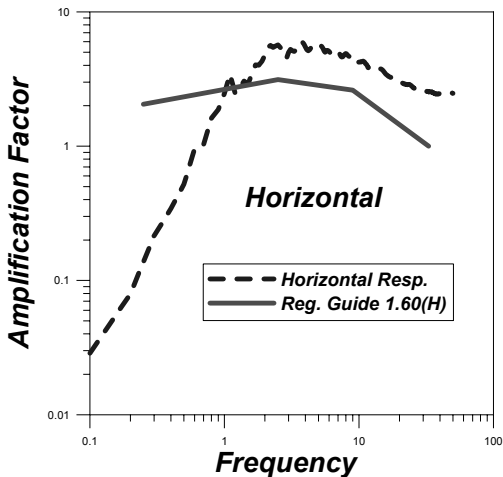


Fig. 2. Comparisons of Horizontal MPOSD with Reg Guide 1.60

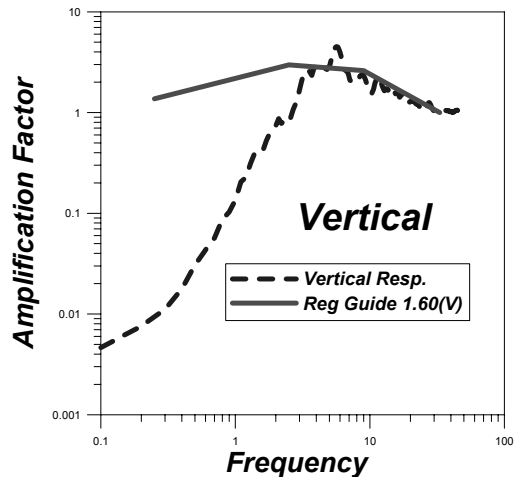


Fig. 3. Comparisons of Horizontal MPOSD with Reg Guide 1.60

직 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 표준설계 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 의하면 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 기준값을 가져야 한다.

Fig. 4에서 실선과 곡선의 조합으로 이루어진 3개 곡선은 x축에 가까운 곡선으로부터 점차 큰 순서대로 지반조건 SC, SD 및 SE 조건의 표준 설계응답스펙트럼이다. 즉 SE 지반조건에서는 건축물을 내진설계 할 경우 다른 2개 지반조건에 비해 내진설계 기준값이 상대적으로 크므로 내진설계를 보다 크게 강화하여야 하는 것을 의미한다. 지반조건 SE, SD 및 SC와 같은 3개의 지반조건을 선택한 것은 국내 지반은 SD조건에 해당하는 것이 대부분이고 일부 SC 및 SE 조건의 지반으로 이루어져 있기 때문이다. 또한 점선으로 이루어진 2개의 곡선중 상부의 것은 지진자료 분석결과 얻어진 수평

성분 응답스펙트럼이고 하부의 것은 수직성분 응답스펙트럼 분석 결과이다.

Fig. 4의 수직성분의 관측지진 자료를 처리한 응답스펙트럼 결과값이 아주 짧은 단주기 일부 대역에서 SE 조건 지반조건에 기준값을 초과하고 있으나 대부분의 주기구간에서 SD 지반 조건의 기준과 유사한 특징을 보여 주고 있다. 약 1초 이상의 장주기 대역에서는 오히려 기준보다 낮은 값을 보여주고 있다. 따라서 처리한 결과값이 기준보다 작은 값을 보여주고 있어 기준을 개략적으로 만족시키고 있다.

하지만 수평성분 자료를 처리한 결과 얻어진 응답스펙트럼은 2초 보다 작은 단주기 대역에서 내진설계 기준값을 대단히 크게 초과하고 있다. 이는 예상된 결과로서 기준응답스펙트럼을 만들기 위해 지진위험도 계수를 적용할 때 일반적인 건축물에 적용하고 있고 심각한 정도가 중간에 해당하는 짧은 기간의 재현주기로서 500년 재현주기로 지진위험도 계수를 선택하였기 때문이다(Fig. 4). 상대적으로 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60은 약 4,000년에서 5,000년 재현주기를 갖고 있고 앞의 비교 분석에서 분석결과가 이를 초과하였기 때문에 약 500년 주기의 기준을 크게 초과하는 것은 당연하다.

국내에서 관측된 지진자료를 처리하여 분석된 응답스펙트럼의 값이 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역에서 기준값 보다 초과하는 현상은 김준경(2003, 2005), 윤종구 외(2006), 선창국 외(2007) 및 김성균(2007) 등의 기존 연구에서도 관측소 부지의 증폭현상에 의한 영향으로 지적되었다. 하지만 본 연구결과는 수평성분이 원자력 관련 내진설계기준과의 비교에서 특히 1 Hz 이상의 광범위한 대역에서 초과하는 현상이 보이고 있어 초과하는 주파수의 대역이 더욱 광범위함을 보여주었다. 특히 국내에 존재하는 대부분의 토목 및 건축 구조물의 경우 약 1 Hz에서 약 5 Hz의 범위에서 고유 주기를 가지고 있으므로 특히 이러한 주파수 대역에서 구조물의 응답이 대단히 중요하다. 따라서 향후 지진데이터베이스를 질적 및 양적으로 보완 또는 확장과 정규화를 위한 연구가 필요하고 이러한 현상은 국내 지각의 주파수별 감쇠특성과도 일부 관련되어 발생한 현상으로 판단된다.

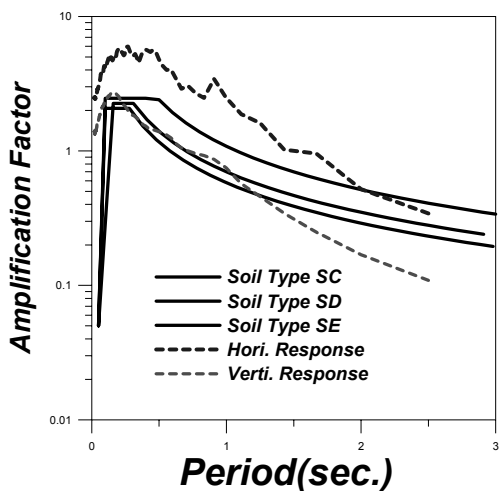


Fig. 4. Comparisons of Horizontal, Vertical MPOSD with Korean Standard Response Spectrum(SC, SD & SE Soil Type)

## 6. 결론

최근 발생한 5개의 중규모 지진으로부터 관측된 지반진동 파형을 이용하여 응답스펙트럼을 분석하였으며,

국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준(Reg Guide 1.60) 및 국내 일반 구조물 및 건축물의 내진설계기준(건교부, 1997)과 각각 비교하였다. 일반적으로 건축 및 토목 구조물의 감쇠율은 3 - 7% 정도이기 때문에 중간에 해당하는 값인 5% damping값에 대해 응답스펙트럼을 계산하여 비교하였다.

응답스펙트럼을 분석한 결과를 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준과 비교할 때 기준을 초과하는 주파수 대역 그리고 초과 수준 등의 특징에 있어서 수평 및 수직 응답스펙트럼이 커다란 차이를 보여주었다. 수평성분은 약 1 Hz 이상의 대역에서 현재 적용중인 내진설계 기준의 보수성에 문제가 있고 내진설계 기준을 보다 크게 강화할 필요가 있다고 분석된다. 수직성분은 극히 일부 주파수 구간에서 초과하였으나 해당 내진설계 기준의 보수성에는 큰 영향이 없는 것으로 분석된다.

또한 수평성분 응답스펙트럼과 수직성분 응답스펙트럼 분석결과를 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼과 동시에 비교하였다. 수평성분 지진자료를 처리한 결과 얻어진 응답스펙트럼은 2초 보다 작은 단주기 대역에서 내진설계 기준값을 크게 초과하고 있어 500년 재현주기에 해당하는 표준 설계응답스펙트럼의 기준도 역시 보수성에 문제가 있음을 보여 주었다. 이는 예상된 결과로서 지진 위험도 계수를 적용할 때 심각한 정도가 중간급에 해당하는 비교적 짧은 기간의 재현주기에 해당하는 500년 재현주기를 선택하였고, 원자력 관련 시설물의 내진설계 기준은 4,000년 내지 5,000년의 재현주기에 해당하기 때문이다.

위에서 제시된 연구결과에서 원자력 관련 시설물의 내진설계 기준값을 초과하는 현상은 국내의 지각구조에 의한 감쇠특성 및 지진관측소 부지증폭 특성이 부분적으로 기여하는 것으로 판단된다. 특히 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역 전체에서 기준값을 초과하고 있는 현상은 원자력 산업계에서도 계속 지적되어 왔을 뿐만 아니라 윤종구 외(2006) 및 선창국 외(2007)의 연구에서도 관측소 부지의 지반증폭과의 관련성 등 문제점이 이미 제시된 바가 있다.

하지만 본 연구 결과는 수평성분의 경우 약 10 Hz 보다 훨씬 저주파수인 약 1 Hz 이상의 주파수 전체 대역에서 심각하게 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준을 초과하고 있다. 따라서 향후 국내 실정에 적합한 내진설계를 위한 설계응답스펙트럼을 제시하기 위해 수평 성분 응답스펙트럼의 경우 1 Hz 이상의 고주파수 전체 대역에서 초과하고 있는 현상을 규명하기 위한 연구가 필요하다. 이를 위해 국내에서 발생하고 있는 지진

의 지진원 특성 및 국내 지각구조에 의한 지진파 전파 특성을 고려하여 기준값을 심각하게 수정할 필요가 있다고 분석된다. 또한 향후 오대산지진을 포함한 5개 지진 뿐만 아니라 여타 국내에서 발생한 규모 3이상의 모든 중규모급 지진으로부터 관측된 광대역 지진자료를 보강하여 분석하면 대표성이 보다 보강되어 의미있는 결과를 얻을 수 있다고 분석된다. 또한 응답스펙트럼을 분석할 때 정규화 방법 등을 다양화 하는 등 평가방법의 다양화를 통한 결과 비교도 필요하다. 그리고 설계 기준보다 초과하는 현상에 대한 부분적 원인으로 제시된 관측소 지반 증폭 특성에 대해 보다 많은 연구결과까지 고려할 경우 보다 의미있는 결과를 또한 얻을 수 있다고 분석된다.

## 감사의 글

본 연구는 2007년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술개발사업(CARTER 2007 -5107)”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), pp. 179-186.
3. 김준경, 2003, 국내 지진의 응답스펙트럼 특성 분석, 한국원자력안전연구원 연구보고서, 한국원자력안전기술원, pp. 152.
4. 김준경, 2005, 발파에 의한 지반진동의 응답스펙트럼 분석, 한국암반공학회, Vol No, pp. 338-343.
5. 윤종구, 김동수, 방은석, 2006, 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 계산에 대한 연구(I), 국내 내진설계기준의 문제점, 한국지질공학회, 10(2), pp. 39-50.
6. 선창국, 정충기, 김동수, 김재관, 2007, 역사지진 피해발생 읍성지역에 재한 부지고유의 지진응답 평가, 한국지질공학회, 17(1), pp. 1-13.
7. 이희현, 채원규, 남순성, 1996, 지진파의 스펙트럼 입문, 도서출판 골드, pp. 260.
8. Benioff, H., 1934, The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness, Bulletin of the Seismological Society of America, 24(2), pp. 88-97.
9. Biot, J. A., 1941, A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses, Bulletin of the Seismological Society of America, 31(2).
10. 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.
11. Housner, G. W., 1959, Behavior of Structures during Earthquakes, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 85(EM4.), pp. 104-111.
  12. ICBO, 1997, Uniform Building Code, Volume 2- Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials, 1997, pp. 492.
  13. NEHRP, 1997, Recommended provisions for seismic regulation for new building and other structures, FEMA 302/303, part 1(Provisions) and Part 2(Commentary).
  14. 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), pp. 287-303.
  15. 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.
  16. 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.
  17. Regulatory Guide 1.60, 1968, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Pans, USNRC.



### 김준경

1978년 서울대학교 자원공학과 학사  
 1980년 서울대학교 자원공학과 석사  
 1989년 미국 University of Arizona, 이학 박사  
 1989년 Dept of Geoscience 지구물리전공

Tel: 043-649-1319

E-mail: kimjkl@unitel.co.kr

현재 세명대학교 공과대학 소방방재학과 교수

---