

## Fukuoka 연속 지진의 관측자료를 이용한 수평 응답스펙트럼 특성 분석

김준경\*

### Analysis of Characteristics of Horizontal Response Spectrum of Ground Motions from Fukuoka Earthquakes Series

Jun Kyoung Kim\*

**Abstract** The horizontal response spectra using the observed ground motions from 15 Fukuoka earthquake series, including main earthquake (2005/03/20; Mw=6.5), were analysed and then were compared to both the seismic design response spectra (Regulatory Guide 1.60), applied to the domestic nuclear power plants, and the Korean Standard Design Response Spectrum for general structures and buildings (1997). 178 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 higher values for frequency bands at two frequency bands (about 8 - 10 and 16- 20 Hz) than Regulatory Guide 1.60. The results were also compared to the Korean Standard Building Design Spectrum for the 3 different soil types and showed that the horizontal response spectra revealed higher values for almost all period bands than the Korean Standard Response Spectrum (500 yrs; Return Period; Seismic province 1; SE soil conditions). Through the qualitative improvements and quantitative enhancement of the observed ground motions, the diversity of the observed ground motions should be considered more significantly to improve the certainty of response spectrum.

**Key words** Horizontal response spectrum, Regulatory Guide 1.60, Korean building design response spectrum, Fukuoka earthquake

**초 록** 2005년 3월 20일 규모 6.5의 후쿠오카 본진이 발생하였고 이후 발생한 규모 3.7 이상의 15 개 중규모 후쿠오카 지진으로부터 관측된 지반진동 파형을 이용하여 수평 응답스펙트럼을 분석하였다. 결과를 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준과 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다. 수평성분 178개 지반진동을 이용하여 고유진동수별 지반응답을 구하고 최대 지반 가속도 값을 이용하여 정규화 분석을 수행하였다. 연구결과는 응답값에 대한 진앙거리 의존성이 대단히 크다는 것을 보여주었다. 또한 국내 원자력시설물의 내진기준인 Regulatory Guide 1.60과 비교한 결과는 일부 구간 즉 약 8 ~ 10 Hz 구간과 약 16 ~ 20 Hz의 2개의 구간에서 표준편차를 더한 값이 Regulatory Guide 1.60 보다 약간 초과함을 보여 주었다. 또한 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계 응답스펙트럼을 3 개 지반조건에 적용한 결과는 거의 모든 주기 대역에서 분석된 응답스펙트럼이 SE 지반조건에 설계 응답스펙트럼(500년 재래주기, 지진구역 1, SE 지반조건)을 초과하고 있다. 500년 재래주기는 가장 약한 내진 설계기준에 해당하기 때문에 거의 모든 주기 대역에서 본 연구로부터 분석된 응답스펙트럼이 해당 기준을 초과하고 있다. 신뢰성을 보다 증가시키기 위해 향후 한반도 및 한반도 주변 해외 발생 지진으로부터 관측된 지진자료를 대폭적으로 보강하여 관측 지진자료의 다양성을 유지하는 것이 필요하다.

**핵심어** 수평응답스펙트럼, Reg. Guide 1.60, 한국건축물 내진 응답스펙트럼, 후쿠오카 지진

Received: Aug. 19, 2014

Revised: Oct. 6, 2014

Accepted: Oct. 6, 2014

\*Corresponding Author: Jun Kyoung Kim

Tel) +8243649-1319, Fax) +8243644-1112

E-Mail) kjk-512@semyung.ac.kr

Department of Fire & Disaster Prevention, Semyung University  
579, Sinwoul-dong, Jecheon-city Chungbuk 390-711, Korea

## 1. 서 론

최근 한반도 주변 지역에서 대규모 및 중규모 지진이 자주 발생하여 향후 내진설계 응답스펙트럼 분야에 대해 중요성이 재고되고 있다. 설계지반운동의 특성은 일반적으로 응답스펙트럼으로 표현된다. 설계응답스펙트

럼은 우리나라 고유의 지진지체구조 특성, 진앙거리에 따른 감쇠 특성 및 고유주기 등을 기초로 하고 있다. 그러나 해당 분야에 대한 연구가 충분하지 못해 1997년에 건설교통부에 의해 제시된 건축물 및 구조물을 위한 응답스펙트럼(건설교통부, 1997)이 약 20 여년 동안 개정하지 않고 계속 채택되고 있다.

응답스펙트럼에 대한 연구는 Benioff(1934)에 의해 시작되었고 Biot(1941)가 지진공학에 적용하였다. 또한, Housner(1959)가 본격적으로 연구 및 응용을 시작하였고, 강진으로부터 관측된 지반진동의 수평성분을 이용하여 최초로 내진설계에 적용된 응답스펙트럼을 개발하였다. Housner(1959)는 4개의 강진으로부터 관측된 8개 수평성분 지반진동 자료를 이용하여 내진설계를 위한 응답스펙트럼을 개발하였고, 이것이 내진설계에 이용된 최초의 스펙트럼이다. 이후 Newmark et. al.(1973a, 1973b, 1973c) 및 Boore et. al.(1994) 등이 주도적으로 응답스펙트럼에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서 수행된 연구는 Kim(2009), Kim et. al.(2010), Kim(2011), Kim(2013) 및 Yoon, et. al.(2006) 등의 연구가 있으며 주로 원자력 분야와 관련하여 수행되어 왔다.

특히 수직성분 응답스펙트럼에 대한 몇몇 연구(Yang and Lee, 2007, Bozorgnia and Campbell, 1995)는 일반적으로 사용되어 오고 있는 스케일 값과 다른 연구결과들을 제시하였다. 일반적으로 사용되어 오고 있는 스케일 값은 관심 고유진동수 대역에서 일률적으로 수평성분 응답스펙트럼에 약 2/3를 곱하여 적용한 값이고, 이를 수직성분 응답스펙트럼 사용하고 있다. Kim et. al.(2010)은 국내 발생 지진자료를 이용하여 수직성분 응답스펙트럼에 대한 연구를 수행하였고, 일부 고유진동수 구간에서 2/3 값을 초과하는 현상을 제시하였다.

최근 연구결과는 여러 가지 인자가 응답스펙트럼 특성에 영향을 미친다고 제시하고 있고, 이 중에서 특히 고유진동수, 진앙거리, 부지의 지반 종류, 지진규모 및 지진원의 단층운동 형태 등이 영향을 크게 미치고 있다고 제시하고 있다(Bozorgnia and Campbell, 2004, Elgamel and He, 2004).

2005년 3월 20일 규모 6.5의 후쿠오카 본진이 발생하였고 이후 동일 지역에서 발생한 규모 3.7 이상의 15개 중규모 후쿠오카 지진으로부터 관측된 지반진동 자료를 이용하여 응답스펙트럼을 분석하였다. 본 연구는 여러 가지 영향인자 가운데 수평 성분 응답스펙트럼의 특성에 영향을 미친다고 제시된 여러 가지 인자 가운데 특히 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있는 진앙거리 및 진동수에 의한 영향을 분석하였다. 또한 결과를 국내 원자력 시설물에 관한 내진설계 기준 뿐만 아니라

국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하여 분석하였다.

## 2. 지반진동 자료

2005년 3월 20일 본진 발생 이후 본진을 포함하여 15개 후쿠오카 지진이 발생하여 다수의 국내 관측소에서 관측되었고, 8개 주요 관측소 각각에서 관측된 15개 후쿠오카 지진의 발생일자 및 규모는 Table 1에 제시되어 있다. Fig 1은 후쿠오카 본진과 8개 관측소 지리적 위치를 보여주고 있다. Table 1에서 제시된 지진들을 선택한 이유는 후쿠오카 지진은 본진을 포함하여 모두 15개의 중규모 지진이 약 2달 이내의 짧은 기간 동안 또한 좁은 지역에서 집중적으로 발생하여 진앙이 시간 및 공간적으로 제한되어 있는 특징이 있기 때문이다. 따라서 임의의 관측소에서 좁은 진앙 지역으로부터 발생한 다수의 지진파형을 관측할 수 있다. 이로 인해 지진파의 전파 경로가 거의 중첩되어 지진파 전파 중간매질 요소가 야기 가능한 불확실성을 다소 감소시킬 수 있기 때문이다.

우선 일반적인 신호 대 잡음비를 분석하기 위해 지반진동의 S 파에 해당하는 신호대역과 P파가 도달하기 전 약 20초 동안의 배경잡음(background noise) 등 2개 시간구간에 대해 지반진동을 분석하였다. Fig. 2(a) 및 2(b)(Kim, 2013)는 HKU 및 HSB 2개 관측소에 대해 신호 대 잡음비를 분석한 결과이다. HKU 및 HSB의 2개 관측소는 공통적으로 극히 일부 구간을 제외하고 전체 진동수 구간에서 신호수준이 잡음수준보다 대수값으로 비교할 때 약 3 또는 그 이상의 차이로 높다. 그리고 HKU 관측소는 진동수가 증가할수록 신호의 진폭이 감소하다가 다시 약 20에서 40 Hz 구간에서 갑자기 높아졌다가 감소한다.

Table 1에서 제시된 바와같이 KRA 관측소는 후쿠오카 본진이 발생 당시 가장 가까운 진앙거리에 위치하고 있지만 규모가 가장 큰 본진 뿐만 아니라 많은 지진으로부터 관측된 파형이 매우 커다란 배경잡음을 가지고 있었다. 따라서 다수의 지반진동이 분석할 때 제외되었다. 결과적으로 진앙거리가 먼 다른 관측소에 비해 상대적으로 적은 단지 7개 지진으로부터 관측된 파형이 분석에 이용되었다.

Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 178개의 수평 성분 지반진동 자료를 처리하여 분석하였다. 지반진동의 자료타입은 지반중폭 분석에 일반적으로 이용되는 가속도 자료이며 지반진동의 샘플링 간격은 1초에 100개 즉 0.01초이다. S파 에너지의 발달 정도 즉 진폭의 최대

**Table 1.** List of Seismic Stations and Earthquake Occurrence Dates

Station Name	Geographic Location	Event Date List	Event Number
GKP1	Kyoungbook National University	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7) 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9), 2005/03/20/11/08 (ML 3.7), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2) 2005/03/20/05/32 (ML 3.9), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	14
KRA	Gori Nuclear Power Plant	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4), 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7), 2005/03/22/06/55 (ML 4.3)	7
KHD	Ganghwado	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2) 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	11
GSU	Geyongsang National University	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7) 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4) 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9) 2005/03/20/11/08 (ML 3.7), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2) 2005/03/20/05/32 (ML 3.9), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	14
HKU	Gyowon National University	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7) 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	11
HSB	Hongseong	2005/04/10/11/33 (ML 4.4), 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7), 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9), 2005/03/20/11/08 (ML 3.7), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2), 2005/03/20/05/32 (ML 3.9), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	11
SNU	Seoul National University	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4), 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	7
TJN	Daejeon	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7) 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9), 2005/03/20/11/08 (ML 3.7), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2) 2005/03/20/05/32 (ML 3.9), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	14
Total	-	-	89

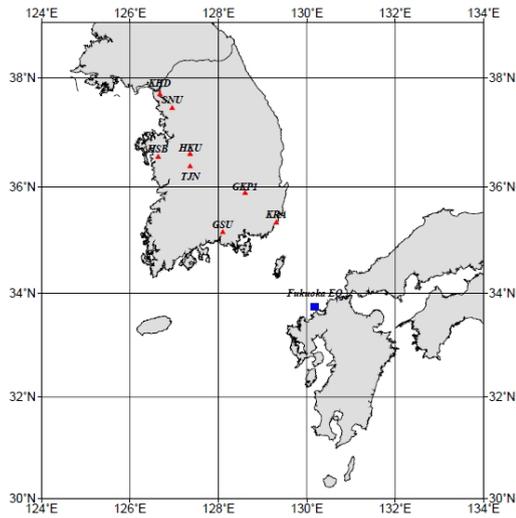


Fig. 1. Locations of Fukuoka Main Earthquake and 8 Seismic Stations

크기 및 지속시간은 지진규모 및 진앙거리 등이 영향을 주지만 지반진동의 시간은 일률적으로 지반진동의 주어진 지속시간 전체 구간을 입력하였다.

### 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 우선 계산하고 다음에 각각의 주기 또는 진동수에 대해 최대 반응을 구할 수 있다. 유사 가속도 스펙트럼(PSA, Pseudo Spectrum of Acceleration)을 유도하는 과정은 Kim et. al.(2010)에 제시되어 있고 식 (1)과 같이 정의된다.

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

여기서,  $u(t)$ 는 상대변위,  $\omega$ 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 스펙트럼

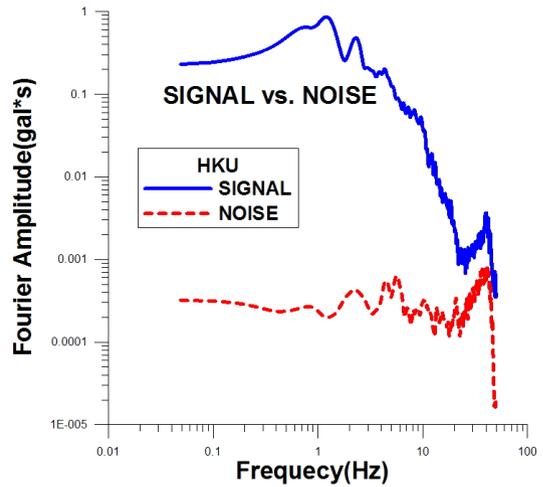


Fig. 2 (a). Signal vs. noise comparison at HKU station

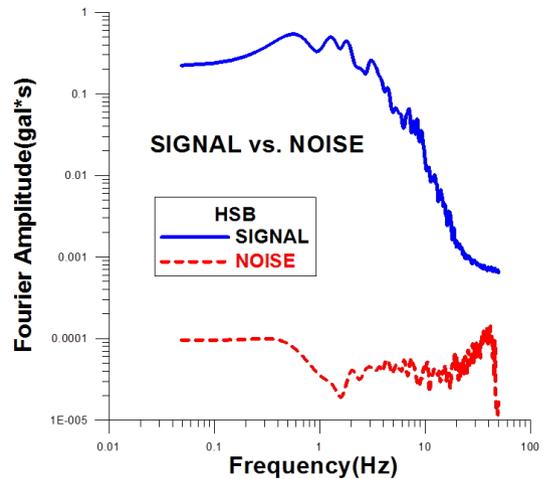


Fig. 2 (b). Signal vs. noise comparison at HSB station

을 나타낸다.

### 4. 연구방법

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

약 30 Hz이상의 고주파 영역의 지반진동은 일반적으로 빨리 감쇠할 뿐만 아니라 주요 구조물 전체에 심각

**Table 2.** Epicentral Distances form Main Fukuoka Earthquake (2005/03/20/01/53; Mw 6.5)

Station Name	KRA	GSU	GKP1	TJN	HKU	HSB	SNU	KHD
Epicentral Distance (km)	188.66	239.54	272.47	382.58	402.59	441.59	498.76	551.62

한 구조적인 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 또한 결과를 비교할 대상 중의 하나에 해당하는 국내 원자력시설물의 내진기준으로 Regulatory Guide 1.60(USNRC, 1968)가 있고, 이 기준은 역시 약 33 Hz까지 응답값을 제시하고 있다. 고유진동수 영역에 대한 여유를 감안하여 최대 고유진동수 50 Hz까지 응답을 계산하였고 그 결과를 상호 비교하였다.

물론 구조물마다 다양한 고유주기를 갖고 있지만 대부분의 토목 및 건축 구조물은 약 1 Hz에서 약 5 Hz의 범위에서 고유주기를 가지고 있으므로 특히 여기에 해당하는 고유진동수 대역의 다양한 구조물의 응답 특성이 대단히 중요하다.

각 지진으로부터 관측된 지반진동 자료는 진앙거리, 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 개별 지반진동의 최대 지반가속도에 대해 각각의 응답스펙트럼을 정규화한 후에 응답스펙트럼을 구하는 것이 일반적이다. 정규화하는 방법으로 최대 지반가속도, 유효 최대가속도(Effective Peak Acceleration), 및 스펙트럼 강도(Spectrum Intensity)를 이용하는 방법 등 3가지 종류로 분류되고 있으나 본 연구는 최대지반가속도에 의한 정규화 방법을 일률적으로 적용하였다.

## 5. 연구 결과

일반적으로 건축 및 토목 구조물은 감쇠율이 3%에서 7%의 범위를 가지고 있고 이 중에서 가장 일반적으로 비교되고 있는 5% 감쇠값에 해당하는 응답을 계산하여 분석하였고 앞서 제시한 바대로 최대 지반가속도값을 이용하여 정규화된 응답스펙트럼을 분석하였다.

Fig. 3에서 Fig. 10까지 8개 그림은 각각 KRA, GSU, GKP1, TJN, HKU, HSB, SNU 및 KHD 등 8개 주요 국내 지진관측소의 진앙거리 순서대로 응답스펙트럼을 분석한 결과이다. 후쿠오카 본진으로부터 8개 주요 국내 지진관측소까지 진앙거리는 Table 2에 제시되어 있다.

각각의 그림에서 가로축은 구조물의 고유 진동수(단위 Hz)를 나타내고 세로축은 최대 지반가속도값에 대해 정규화 방법을 이용한 결과이며 응답의 증폭계수를

의미한다. 각각의 그림은 0.1 Hz부터 50 Hz까지 0.1 Hz씩 증가하면서 각각 고유 진동수에서 다수의 지반진동 자료를 처리한 응답스펙트럼의 평균값과 평균값에 표준편차를 더한 값을 제시하고 있다. 그리고 각각의 지반진동에 대한 모든 응답스펙트럼을 동시에 제시하였다.

Fig. 3은 KRA 관측소(고리 원자력 발전소)에서 관측된 14개 수평 성분(남북 및 동서 성분 포함)을 이용하여 분석한 결과이다. KRA 관측소는 진앙거리가 188.66 km이고 8개 관측소중 가장 가까운 관측소이다. 7개 후쿠오카 연속지진으로 관측된 전체 자료를 처리한 결과, 평균값 및 표준편차 값을 더하여 각각 나타내었다. 낮은 진동수 대역에서 KRA 관측소의 응답값이 진앙거리가 상대적으로 커다란 관측소의 응답값과 비교할 때 크기가 상대적으로 대단히 작은 특징을 보여 준다. Fig. 4는 GSU 관측소(경상대)에서 관측된 28개 수평성분을 이용하여 분석한 결과이다. GSU 관측소는 진앙거리가 239.54 km이고 14개 관측소중 가운데 2번째 진앙거리가 작은 관측소이다. 14개 후쿠오카 지진으로부터 관측된 전체 자료를 처리한 결과, 평균값 그리고 표준편차 값을 더하여 각각 나타내었다. Fig. 5는 GKP1(경북대) 관측소에서 관측된 수평 28개 성분을 이용하여 분석한 결과이다. 14개 후쿠오카 지진으로 관측된 전체 자료를 처리한 결과와 평균값 및 표준편차 값을 더하여 각각 나타내었다. GKP1 관측소는 진앙거리가 272.42 km이고 8개 관측소 가운데 3번째 가까운 관측소이며 GSU 관측소와 진앙거리가 유사하다.

Fig. 6은 TJN(대전 한국지질자원연구원) 관측소에서 관측된 28개 수평 성분을 이용하여 분석한 결과이다. TJN 관측소는 진앙거리가 382.58 km이고 8개 관측소중 4번째 진앙거리가 작은 관측소이다. 14개 후쿠오카 지진으로 관측된 전체 자료를 처리한 결과와 평균값 및 표준편차 값을 더하여 각각 나타내었다. Fig. 7은 HKU(한국교원대학) 관측소에서 관측된 22개 수평 성분을 이용하여 분석한 결과이다. HKU 관측소는 진앙거리가 402.59 km이고 8개 관측소중 5번째 가까운 관측소이다. 11개 후쿠오카 지진으로 관측된 전체 자료를 처리한 결과와 평균값 및 표준편차 값을 더하여 각각 나타내었다. Fig. 8은 HSB 관측소(홍성)에서 관측된 22개 수평성분을 이용하여 분석한 결과이며, 가장 많은 후쿠

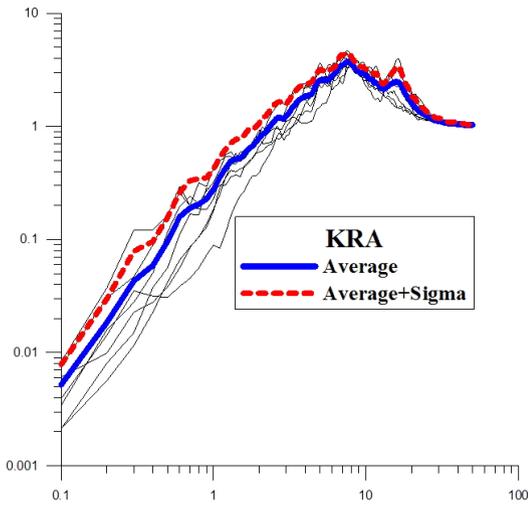


Fig. 3. Individual (7), Average, Average+Sigma Horizontal Response Spectra for KRA Station

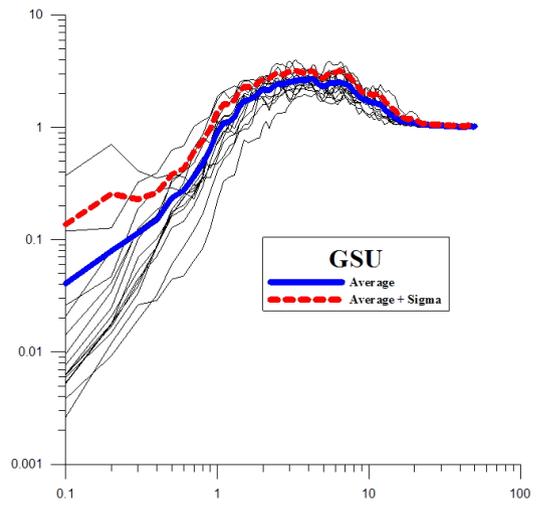


Fig. 4. Individual (14), Average, Average+Sigma Horizontal Response Spectra for GSU Station

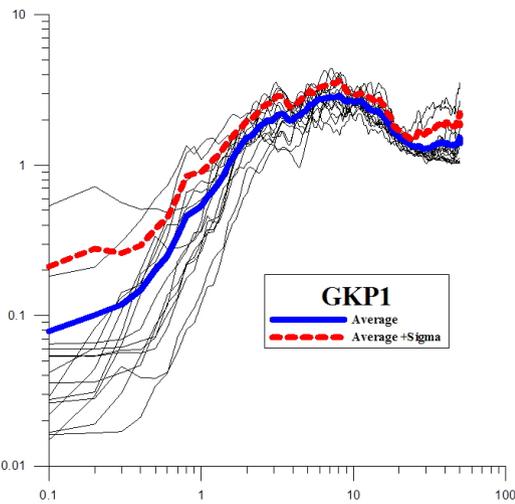


Fig. 5. Individual (14), Average, Average+Sigma Horizontal Response Spectra for GKP1 Station

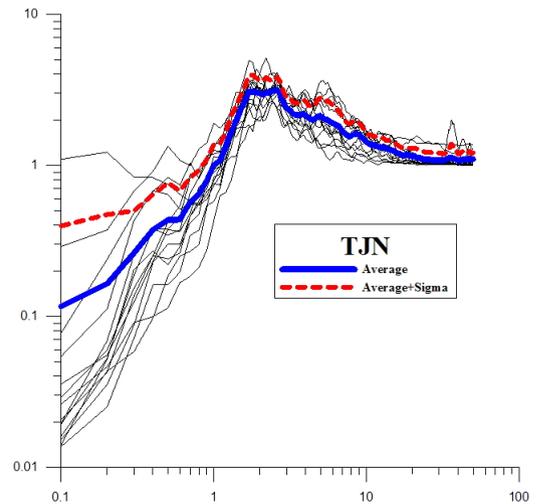


Fig. 6. Individual (14), Average, Average+Sigma Horizontal Response Spectra for TJN Station

오카 지진을 관측한 관측소이다. HSB 관측소는 진앙거리가 441.59 km이고 8개 관측소 가운데 6번째 가까운 관측소이다. 11개 후쿠오카 지진으로 관측된 자료를 처리한 결과와 평균값 및 표준편차 값을 더하여 각각 나타내었다.

Fig. 9는 SNU 관측소(서울대학교)에서 관측된 14개 수평 성분을 이용하여 분석한 결과이다. SNU 관측소는 진앙거리가 498.76 km이고 8개 관측소 가운데 7번째

가까운 관측소이다. 7개 후쿠오카 지진으로 관측된 자료를 처리한 결과와 평균값 및 표준편차 값을 더하여 각각 나타내었다. Fig. 10은 KHD 관측소(강화도)의 22개 수평 성분을 이용하여 분석한 결과이다. KHD 관측소는 진앙거리가 551.62 km이고 8개 관측소 가운데 가장 멀리 위치하고 있는 관측소이다. 11개 후쿠오카 지진으로 관측된 자료를 처리한 결과와 평균값 및 표준편차 값을 더하여 각각 나타내었다.

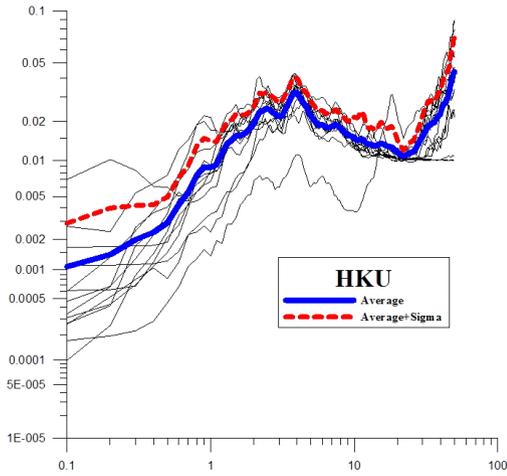


Fig. 7. Individual (11), Average, Average+Sigma Horizontal Response Spectra for HKU Station

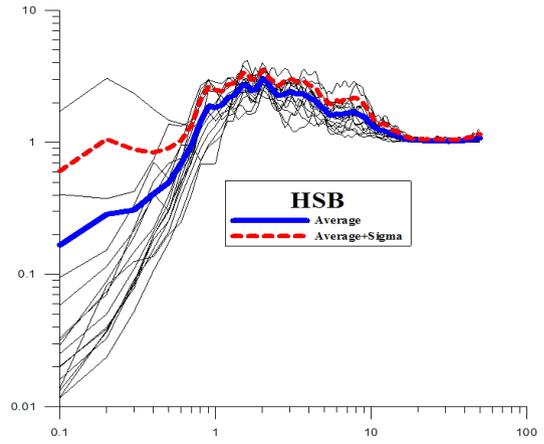


Fig. 8. Individual (11), Average, Average+Sigma Horizontal Response Spectra for HSB Station

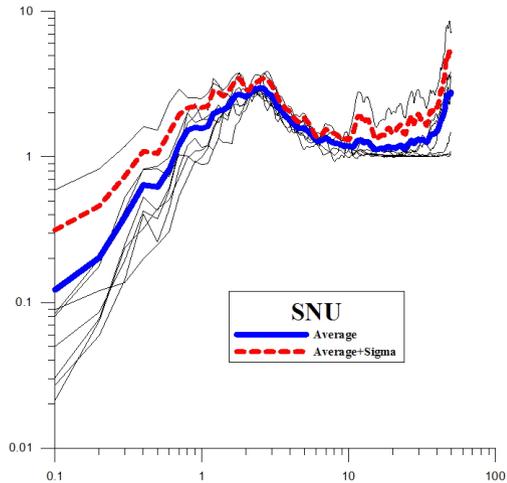


Fig. 9. Individual (7), Average, Average+Sigma Horizontal Response Spectra for SNU Station

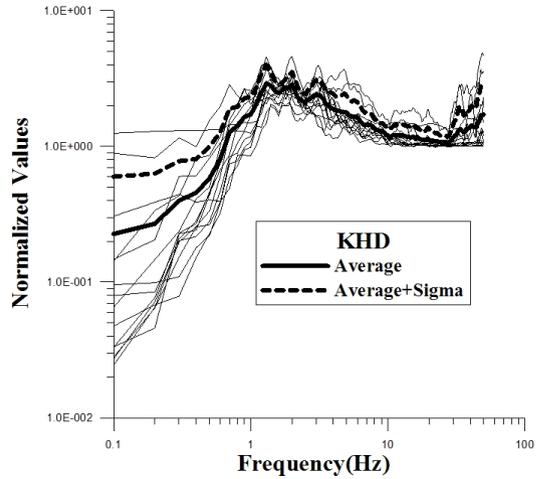


Fig. 10. Individual (7), Average, Average+Sigma Horizontal Response Spectra for KHD Station

5.1 진앙거리 변화에 의한 영향

Fig. 11은 8개 관측소 전체의 수평 응답스펙트럼 분석 결과(각각의 평균값)를 모두 보여주고 있다. 8개 관측소의 수평 응답스펙트럼의 최대값의 크기는 거의 유사하지만 최대값의 진동수 위치가 관측소의 진앙거리에 따라 변화하는 특징을 보여 주고 있다.

8개 국내 관측소 가운데 진앙으로부터 상대적으로 가까운 3개 관측소 즉 KRA(고리원자력발전소), GSU(경상대학교) 및 GKPI(경북대학교)는 약 188 km에서 272 km의 진앙거리 범위에 위치하고 있으며 분석 결과는

굵은 실선으로 표시되어 있다. 최대값의 크기는 거의 유사하지만 최대값에 해당하는 진동수 위치가 다른 그룹에 비하여 상대적으로 높은 진동수에 존재하고 있다. 그리고 낮은 진동수 대역에서 진앙거리가 먼 2그룹에 비해 보다 응답값이 가장 작은 값을 가지고 있음을 보여주고 있다.

진앙거리가 상대적으로 가장 큰 3개 관측소 즉 HSB(홍성), SNU(서울대학교) 및 KHD(강화도)는 약 442 km에서 552 km의 진앙거리 범위에 있으며, 분석한 결과는 열은 실선으로 표시되어 있다. 최대값의 크기는

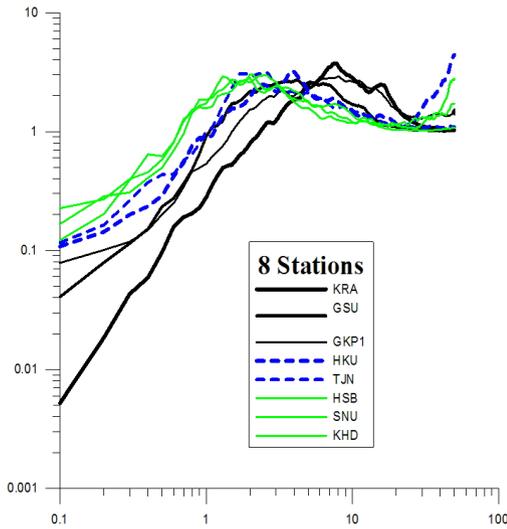


Fig. 11. 8 Horizontal Response Spectra for 8 Seismic Stations using 178 Horizontal Ground Motions

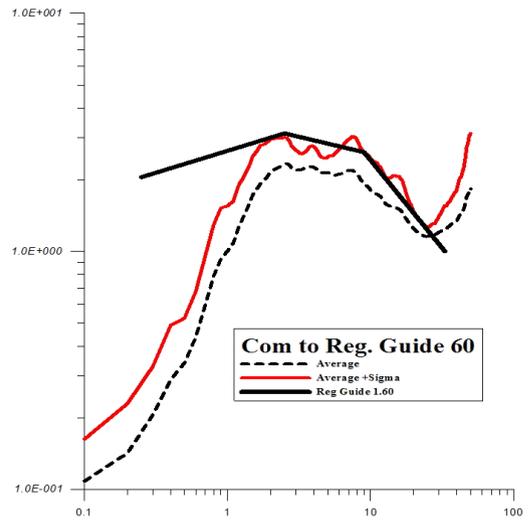


Fig. 12. Comparison of Average, Average+One Sigma Horizontal Response Spectrum of 8 Seismic Stations with US NRC's Standard Response Spectrum

Table 3. Response spectrum values from Regulatory 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

거의 유사하지만 최대값의 진동수 위치가 다른 2 그룹에 비하여 상대적으로 낮은 진동수에 위치하고 있다. 또한 낮은 진동수 대역에서 진앙거리가 가까운 2 그룹에 비해 응답값이 가장 큰 값을 가지고 있다.

TJN(대전 한국지질자원연구원) 및 HKU(한국고원대학교) 관측소는 약 383 km에서 403 km의 진앙거리 범위에 있으며 진앙거리가 중간 그룹에 속하고 분석 결과는 점선으로 표시되어 있다. 최대값의 크기는 다른 2개 그룹과 거의 유사하지만 최대값의 진동수 위치가 2개 그룹의 중간에 위치하고 있다. 그리고 낮은 진동수 대역에서 응답값이 다른 2그룹의 중간에 해당하는 값을 가지고 있다.

따라서 3개 진앙거리 그룹의 8개 수평성분 응답스펙트럼은 진앙거리가 증가할수록 응답의 최대값의 진동수 위치가 왼쪽으로 즉 낮은 진동수 대역으로 이동하고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 낮은 진동수 대역에서 응답값이 진앙거리가 증가하는 순서대로 점차적으로 큰 값을 가지고 있음을 보여주고 있다. 따라서 진앙거리가 최대값의 진동수 위치 및 낮은 진동수의 응답값의 크기에 크게 영향을 미치고 있다는 결과를 잘 보여주고

있다. 이러한 결과는 최근 연구결과(Bozorgnia and Campbell, 2004, Elgamal and He, 2004)에 의해 제시된 결과와 서로 일관성이 있는 결과이다.

### 5.2 Regulatory Guide 1.60과 비교

Fig. 12는 8개 관측소의 평균값, 표준편차를 더한 값과 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Regulatory Guide 1.60를 상호 비교하고 있다. 국내 원자력발전소 내진설계기준인 Regulatory Guide 1.60은 Table 3에 제시된 바와 같이 국내 일반 구조물 및 건축물에 대한 내진설계기준과 달리 수평 및 수직 성분을 분리하여 기준을 각각 제시하고 있다. Regulatory Guide 1.60가 제시하는 각 진동수에 대한 수평 및 수직 성분 응답값은 Table 3에 제시되어 있다.

Fig. 12는 평균값과 표준편차를 더한 응답스펙트럼과 Regulatory Guide 1.60 즉 원자력 관련 시설물의 내진설계 기준값을 비교하고 있다. 전체 진동수 대역에서 실제 지반진동을 분석한 결과의 평균값 응답스펙트럼이 내진설계 기준값 하부에 위치하고 있어 기준을 만족하고 있음을 보여주고 있다.

하지만 평균에 표준편차를 더한 응답스펙트럼이 일부 구간 즉 약 8 ~ 10 Hz 구간과 약 16 ~ 20 Hz 2개의 구간에서 원자력 관련 시설물의 내진설계 기준값을 다소 초과하고 있다. Regulatory Guide 1.60는 역시 다양한 실제 지반진동의 응답스펙트럼을 계산한 평균값에 기준에 보수성을 보다 강화하기 위해 표준편차를 더하여 도출되었다.

비록 약 8 ~ 10 Hz 구간과 약 16 ~ 20 Hz 구간 즉 2개의 일부 제한된 고유진동수 대역이지만, 2개 대역 모두 공통적으로 약 8 Hz 이상의 높은 진동수 대역에서 내진설계 기준값을 초과하고 있는 현상은 국내 원자력 산업계(Yoon et. al.(2006) 및 Sun et. al.(2007))에서도 계속 지적되어 왔다. 일부 제한된 진동수 대역에서 내진설계 기준값을 다소 초과하는 현상은 물론 국내의 지진관측소 부지증폭 특성도 부분적으로 기여하는 것으로 판단된다. 따라서 향후 한반도 및 한반도 주변 발생 지진으로부터 관측된 지진자료를 대폭적으로 보강하여 보다 신뢰가 있는 분석을 하는 것이 필요하다. 즉 다양한 지진원 및 진앙거리를 고려하여 보다 양적으로 많은 관측자료를 가지고 접근하는 것이 필요하다고 판단된다.

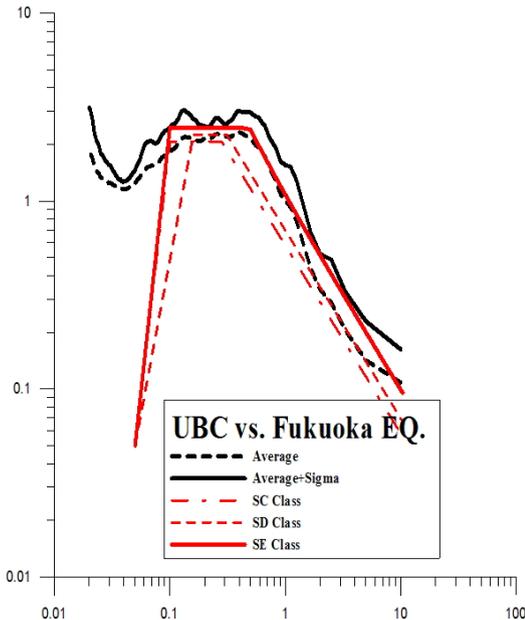


Fig. 13. Comparison of average and average+one sigma horizontal response spectrum of 8 stations with Korean Uniform Building Code Spectrum

### 5.3 국내 일반 구조물 및 건축물에 대한 내진설계기준과 비교

Fig. 13은 8개 관측소의 평균값 및 표준편차를 더한 값과 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준 응답스펙트럼을 비교하고 있다. 그림에서 가로축은 일반 건축물의 응답스펙트럼과 쉽게 비교하기 위해 고유진동수를 대신하여 구조물의 고유주기이며, 세로축은 정규화 과정을 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 나타낸다. 또한 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준은 원자력시설물의 내진설계 기준과는 달리 수평 및 수직 성분의 스펙트럼 모양을 분리하지 않고 있다.

우선 내진설계 대상지역의 지진구역(Seismic Province)과 5개 지반종류(Soil Type)에 대하여 적절한 낮은 고유주기 및 높은 고유주기 각각에서 2개의 지진계수(Ca 및 Cv)를 결정하여야 한다. 이를 이용하여 건축물 설계 응답스펙트럼의 2개의 통제주기(Ts 및 To)를 선정한다. 각각의 지진구역 및 지반 종류에 해당하는 낮은 고유주기(Ca) 및 높은 고유주기(Cv) 각각에서 2개의 지진계수는 Table 4(Ca) 및 Table 5(Cv)에 각각 제시되어 있다.

마지막으로 건물의 중요도 및 사회적으로 요구되는 성능기준을 고려하여 재현주기(recurrence period)에 따른 지진위험도계수(seismic hazard coefficient)를 결정한다. 지진위험도계수는 Table 6에 제시되어 있다. 예를 들면 종합병원 및 다양한 재난 시 거점역할 학교 등

Table 4. 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 5. 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 6.** Seismic Hazard Coefficient

Recurrence Period (year)	50	100	200	500	1,000	2,400
Hazard Coefficient	0.40	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

은 성능을 고려하여 약 2,400년 재현주기의 성능에 대한 지진위험도계수를 적용한다. 가장 일반 구조물은 500년의 재현주기의 지진위험도계수를 이용한다. 약 2,400년 재현주기의 지진위험도계수는 전체 주기대역에서 500년 재현주기의 지진위험도계수에 비해 약 2배의 값으로 이루어져 있다.

Fig. 13에서 파선 및 실선으로 이루어진 3개 그래프는 500년 재래주기의 성능을 임의 설정하고, 응답값이 점차 증가하는 순서대로 지반조건 SC, SD 및 SE 조건 등 3개 지반 조건에 대응하는 설계응답스펙트럼이다. 예를 들면 그림에서 SE 지반조건에서 건축물을 내진설계를 할 경우 지반의 증폭현상을 감안하여 다른 2개 지반 조건에 비해 내진설계 기준값이 상대적으로 커다란 값으로 제시되어 있다. 지반조건 SE, SD 및 SC와 같은 3개의 지반조건을 선택한 것은 국내 지반은 SD 조건에 해당하는 지반이 많은 부분을 차지하고 있고 일부 SC 및 SE 조건의 지반으로 이루어져 있기 때문이다.

8개 관측소 전체의 평균값, 표준편차를 더한 응답스펙트럼을 3개 지반 조건의 기준과 비교할 때 거의 모든 주기 대역에서 본 연구로부터 분석된 응답스펙트럼이 SE 지반조건의 설계 응답스펙트럼(500년 재래주기; 지진구역 1; SE 지반조건)을 초과하고 있다. 500년 재래주기의 성능은 비교적 성능이 약한 내진 설계기준에 해당하기 때문에 거의 모든 주기 대역에서 실제 지반진동을 이용한 응답스펙트럼이 기준을 초과하고 있다. 앞서 지적한 바와 같이 향후 한반도 주변 해외 발생지진 뿐만 아니라 한반도 내부에서 발생된 지진으로부터 관측된 지진자료를 대폭적으로 보강하고 또한 구조물 및 건축물의 성능기준을 고려하는 것이 필요하다.

**6. 결론**

최근 연구결과에 의하면 여러 가지 인자가 응답스펙트럼의 특성에 영향을 미친다고 제시되어 있다. 특히 구조물의 고유진동수, 진앙거리, 부지의 지반 종류, 지진규모 및 지진원의 단층운동 형태 등에 의해 영향이 크다고 제시되고 있다. 본 연구는 여러 가지 영향인자 가운데 수평 성분 응답스펙트럼의 특성에 민감도가 가장 높은 것으로 제시되어 있는 구조물의 고유 진동수(고유주기) 및 진앙거리에 의한 영향을 분석하였고 아

래와 같이 요약하였다.

1. Fukuoka 연속지진으로부터 국내에서 관측된 지반진동을 분석한 결과 수평성분 응답스펙트럼의 특성은 진앙거리에 의한 영향을 받는 것으로 나타났다. 진앙거리 변화는 최대 응답값의 진동수 위치 및 각각 진동수 대역에서 응답값의 크기에 대한 영향을 주고 있다는 것을 확인하였다. 따라서 내진설계 대상인 구조물로부터 잠재단층이 가까이 존재하는 경우 높은 고유진동수 영역에서 구조물의 보수성을 심각하게 고려할 필요가 있다고 해석된다. 그리고 멀리 있을 경우 상대적으로 낮은 고유진동수 영역의 보수성을 보다 심각하게 고려할 필요가 있다고 해석된다. 또한 낮은 진동수 대역에서 응답값이 진앙거리가 증가하는 순서대로 점차적으로 큰 값을 가지고 있음을 보여주고 있다. 이는 저진동수 대역의 에너지는 고진동수 대역 에너지에 비하여 보다 멀리 전파해 간다는 것으로 해석된다.
2. 전체 수평 성분 응답스펙트럼(평균값, 평균값+표준편차)을 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Regulatory Guide 1.60과 비교하였다. 국내에서 관측된 지반진동을 처리한 결과는 약 8 ~ 10 Hz 구간과 약 16 ~ 20 Hz 구간 즉 2개의 일부 제한된 고유진동수 대역에서 내진설계 기준값을 초과하고 있다. 물론 높은 진동수 대역에서 기준값을 초과하는 현상은 타 연구에서도 지적되어 왔지만 향후 한반도 및 한반도 주변 발생지진으로부터 관측된 지진자료를 대폭적으로 보강하여 보다 신뢰가 있는 분석을 하는 것이 필요하다. 즉 다양한 지진원 및 진앙거리를 고려하여 보다 양적으로 많은 관측자료를 이용하여 접근하는 것이 필요하다고 판단된다.
3. 전체 수평 성분 응답스펙트럼(평균값, 평균값+표준편차)을 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 설계응답스펙트럼과 비교하였다. 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준과 비교한 결과 거의 모든 주기 대역에서 분석결과 응답스펙트럼이 SE 지반조건의 설계 응답스펙트럼(500년 재래주기, 지진구역 1, SE 지반조건)을 초과하고 있다. 역시 향후 한반도 및 한반도 주변 해외 발생지진으

로부터 관측된 지진자료를 대폭적으로 보강하여 재래주기와 지진구역 등을 다르게 적용하여 분석결과와 다양성을 유지하는 것이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2014년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술개발사업(CATER 2012-8170)”에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

## Reference

1. Benioff, H., 1934, The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 24(2), 88-97.
2. Biot, J. A., 1941, A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 31(2), 151-171.
3. Housner, G. W., 1959, Behavior of Structures during Earthquakes, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 85(EM4.), 104-111.
4. 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.
5. 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*.
6. 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*.
7. 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*.
8. Kim, J.K., 2009, Analysis of Response Spectrum of Ground Motions from Recent Earthquakes, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 19, No. 6, 490-497.
9. Kim, J.K., Hong, S. M., Park, K. J., 2010, Analysis of Characteristics of Vertical Response Spectrum of Ground Motions from Domestic Earthquakes, *Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, Vol. 13, No. 3, 227-234.
10. Kim, J.K., 2011, Analysis of Characteristics of Horizontal Response Spectrum of Velocity Ground Motions from 5 Macro Earthquakes, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 21, No. 6, 471-479.
11. Kim, J.K., 2013,, Comparison Study of the Dynamic Amplification Characteristics of the Major Domestic Seismic Observation Sites using Background Noise and S-wave Energy of Ground Motions from 15 Fukuoka Earthquakes Series J. *Korean Soc. Hazard Mitig.* Vol. 13, No. 6, 327-334.
12. Yoon, J. K., Kim, D. S., Bang, E., S., 2006, Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (I) - Problem Statements of the Current Seismic Design Code, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 10(2), 39-50.
13. Yang, J., and Lee C. M., 2007, Characteristics of vertical and horizontal ground motions recorded during the Niigata-ken Chuetsu, Japan Earthquake of 23 October 2004, *Engineering Geology*, 94, 50-64.
14. Bozorgnia, Y., and Campbell K. W., 1995, Characteristics of free-field vertical ground motions during the Northridge earthquake, *Earthquake Spectra*, 11, 515-525.
15. 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.
16. Elgamal A., and He, L., 2004, Vertical earthquake ground motion records: an overview, *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 663-697.
17. USNRC, 1968, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, *Regulatory Guide 1.60*.
18. Sun, C. G., Chung, C. K., Kim, D. S., Kim, J. K., 2007, Evaluation of Site-specific Seismic Response Characteristics at Town Fortress Areas Damaged by Historical Earthquakes, *Engineering Geology*, 17(1), 1-13.



**김준경**

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

Tel: 043-649-1319

E-mail: [kjk-512@semyung.ac.kr](mailto:kjk-512@semyung.ac.kr)

현재 세명대학교 공과대학 소방방재학  
과 교수

---