

# 우리나라에서 계측된 중규모 지진 지반운동의 수평 양방향 응답 특성 분석

## A Study on the Characteristics of Bi-directional Responses by Ground Motions of Moderate Magnitude Earthquakes Recorded in Korea

김정한<sup>1)</sup> · 김재관<sup>2)</sup> · 허태민<sup>3)</sup> · 이진호<sup>4)\*</sup>

Kim, Jung Han<sup>1)</sup> · Kim, Jae Kwan<sup>2)</sup> · Heo, Tae Min<sup>3)</sup> · Lee, Jin Ho<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 토목공학과 조교수, <sup>2)</sup>서울대학교 건설환경공학부 교수, <sup>3)</sup>The University of Texas at Austin 박사과정, <sup>4)</sup>부경대학교 해양공학과 조교수

<sup>1)</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University, <sup>2)</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, <sup>3)</sup>Ph. D Candidate, The University of Texas at Austin, <sup>4)</sup>Assistant Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

### / A B S T R A C T /

In a seismic design, a structural demand by an earthquake load is determined by design response spectra. The ground motion is a three-dimensional movement; therefore, the design response spectra in each direction need to be assigned. However, in most design codes, an identical design response spectrum is used in two horizontal directions. Unlike these design criteria, a realistic seismic input motion should be applied for a seismic evaluation of structures. In this study, the definition of horizontal spectral acceleration representing the two-horizontal spectral acceleration is reviewed. Based on these methodologies, the horizontal responses of observed ground motions are calculated. The data used in the analysis are recorded accelerograms at the stations near the epicenters of recent earthquakes which are the 2007 Odeasan earthquake, 2016 Gyeongju earthquake, and 2017 Pohang earthquake. Geometric mean-based horizontal response spectra and maximum directional response spectrum are evaluated and their differences are compared over the period range. Statistical representation of the relations between geometric mean and maximum directional spectral acceleration for horizontal direction and spectral acceleration for vertical direction are also evaluated. Finally, discussions and suggestions to consider these different two horizontal directional spectral accelerations in the seismic performance evaluation are presented.

**Key words:** geometric mean spectrum, maximum directional spectrum, directionality of accelerogram, recorded ground motion in Korea

## 1. 서론

내진설계를 수행하는 데 있어서 가장 중요한 첫 단계는 지진에 의해 구조물에 적용하는 하중을 정량적으로 산출하는 것이다. 지진에 의한 지반진동은 가속도계로부터 시간이력으로 계측되므로 지진하중 역시 시간이력으로 제시될 수 있다. 그러나 시간이력에 의한 세기는 다양한 주기를 갖는 구조물에 미치는 영향을 정확히 표현하기 어렵기 때문에 진동수에 따른 세기, 즉 스펙트럼으로 제시되어야 한다. 이러한 스펙트럼 형식 중에 일반적으로 선호되는 것은 푸리에스펙트럼이다. 시간이력과 푸리에스펙트럼은 서로

일대일 변환이 가능하므로 시간이력에 대한 주파수 성분을 정확히 표현할 수 있다. 그러나 푸리에스펙트럼은 구조물에 작용하는 하중을 직접적으로 산출하기 어렵고 따라서 구조물 주기별로 지진하중을 쉽게 표현할 수 있는 응답스펙트럼이 대부분의 설계기준에서 지진하중 표현 방법으로 사용된다. 특히, 일반적인 구조물의 감쇠조건과 유사한 5% 감쇠비의 유사가속도(pseudo-acceleration) 단자유도 탄성응답스펙트럼을 기본으로 한다.

설계기준들에서 설계응답스펙트럼은 주기에 대한 함수로 주어진다. 수평방향으로는 하나의 스펙트럼을 제시하며 수직방향으로는 수평방향 스펙트럼에 대한 비로 표현하는 경우가 대부분이지만 수직방향을 새로운 형상의 스펙트럼으로 제시[1, 2]하기도 한다. 설계에서는 스펙트럼 형상 자체에 보수성을 도입하거나 방향별 하중 조합 방법에서 보수성이 내재되도록 함으로써 수평방향에 대해 동일한 형태의 설계하중을 적용해도 합리적인 결

\*Corresponding author: Lee, Jin Ho

E-mail: jholee0218@pknu.ac.kr

(Received July 9, 2019; Revised August 12, 2019; Accepted August 12, 2019)

과를 낼 수 있다. 즉, 수평 양방향에 대해 동일한 하중을 적용해도 내진여유도를 확보할 수 있다. 그러나 내진성능을 평가하는 경우에는 보다 현실적인 지진하중이 적용되어야 하는데 이때는 수평 양방향 지진하중이 반드시 동일하다고 할 수 없다. 실제 계속되는 지반운동은 직교하는 수평 양방향에 대한 크기가 다르고 이는 구조물의 지진 거동에 영향을 미치는 중요한 인자가 된다. 따라서 내진성능평가를 위한 입력 지진하중을 결정하기 위해서는 수평 양방향의 지진세기의 차이가 어떠한지 정량적으로 평가되어야 한다.

수평 양방향의 지진세기의 차이는 단지 하나의 값으로 정해지지 않고 어떠한 확률분포를 가지게 될 것이며 또한 주기별로도 그 차이가 달라질 수 있다. 이 연구에서는 기존 설계에서 주어지는 지진하중의 양방향 세기가 어떻게 정해지는지에 대해 검토하고 실제 지진파의 방향별 특성에 대해서 분석한다. 비록 구조물에 큰 영향을 미치지 않는 않았더라도 유의미한 세기를 보인 최근의 몇몇 우리나라 지반운동 관측자료를 토대로 분석하여 국내 지진특성을 이해하는 데에 도움이 되도록 하였다. 이를 반영하여 구조물의 내진성능평가나 내진설계에 적합한 지진하중을 어떠한 기준으로 작성해야 하는지를 논의하고자 한다.

## 2. 수평 양방향 응답스펙트럼의 표현

### 2.1 수평 양방향 대푯값 산정 방법

지진에 의한 진동의 세기를 지진규모와 거리의 함수인 감쇄식으로 표현할 때 계속된 지진파로부터 통계적으로 구하는 것이 일반적이다. 실제 계속된 지진은 수많은 우연적 불확실성(aleatoric uncertainty), 혹은 랜덤성 요인이 들어가 있어서 감쇄식의 잔차가 큰 확률분포를 가진다. 수평 양방향 지진세기의 차이도 이러한 랜덤성의 요인일 수 있으므로 감쇄식의 오차에 확률분포를 줄이기 위해서 수평 양방향 지진세기의 대푯값을 결정하여 한 관측점에서 계속되는 양방향 지진세기를 하나의 값으로 변환한 후 감쇄식을 산출한다. 이를 위해서 많은 연구자들이 랜덤성이 최소가 되도록 수평 양방향의 대푯값을 결정하는 연구를 수행하였다. 이들 양방향 지진세기를 결정하는 방법은 여러 가지가 있다. 평균적인 값을 취하는 방법이나 이를 좀 더 특정한 처리과정을 거쳐 산출하거나, 최대방향에 대한 세기로 하는 것 등이 그 예이다. 여기서는 이러한 방법들에 대해서 간략히 소개한다.

#### 2.1.1 기하평균스펙트럼

감쇄식은 주기별 스펙트럼가속도에 대해서 구해지며 직교하는 수평 양방향에 대해서 다른 값으로 구해진다. 각 주기별로 양방향 스펙트럼가속도의 대푯값을 양방향 성분의 스펙트럼가속도에 대한 기하평균(geometric mean, GM)으로 나타내는 것이 하나의 방법이다. 이 기하평균 방법은 다음과 같은 방식으로 나뉜다.

##### (1) 계측방향 기반 기하평균 스펙트럼

기하평균 스펙트럼을 구하는 가장 단순한 방법은 실제로 계측센서가 설치된 방위각 방향으로 직교하는 두 성분의 값을 식(1)과 같이 기하평균시키는 것이다(As-recorded GM). 그러나 이것은 지진 계측기를 설치한 방향

에 따라 값이 달라지므로 동일한 지진동을 계속하더라도 어떤 방향으로 설치하느냐에 따라 값이 달라지는 랜덤성이 존재한다. 이렇게 평균화된 각각의 계측값에는 차이가 있을 수 있지만 수많은 지진동과 계측위치에 대해서 통계값을 도출하면 이러한 랜덤성이 희석될 수 있기 때문에 감쇄식을 도출하는 데는 이 방법으로도 크게 차이가 나지 않는 것으로 알려져 있다.

$$SA_{As-recorded GM} = \sqrt{SA_x \times SA_y} \tag{1}$$

##### (2) 회전된 방위각에 대한 기하평균 스펙트럼

계측방향 기반 기하평균은 설치된 계측센서의 방향에 따라 값이 달라지기 때문에 이를 보완하기 위한 방법으로 센서의 방향에 독립적인 기하평균값을 구하는 방법이 개발되었다[3, 4]. 수평 양방향을 직교하도록 유지하면서 방위각을 회전시키며 기하평균을 구하게 되면 모든 방향에 대한 기하평균이 구해지기 때문에 센서의 방향에 영향을 받지 않게 된다. 그렇지만 이 값들은 하나가 아니라 어떠한 분포로 구해질 것이다. 이때 이들 기하평균값 분포의 50 백분위수 값을 사용하는 방법을 일반적으로 채택한다. 이러한 기하평균에 대한 백분위수 값은 50 백분위수 뿐만 아니라 다른 백분위수 값에 대해서도 구해질 수 있다. 여기서 50 백분위수에 해당되는 양방향 방위각이 정해질 수 있는데 이 방향은 주기마다 다를 것이다. 이러한 특징들을 표현하는 방식으로 기하평균(GM), 회전(Rot), 주기에 따라 방향이 다른 의존성(D) 그리고 백분위수 값을 나열하여 표현하며, 예를 들어 50 백분위수인 경우 GMRotD50으로 나타낸다.

##### (3) 회전된 방위각에 대한 주기독립인 기하평균 스펙트럼

앞서 기술한 것처럼 회전된 방위각에 대한 어떠한 백분위수에 대한 기하평균을 모든 주기값에 대하여 스펙트럼형태로 그릴 수는 있지만 이때 구성된 스펙트럼은 방향이 모두 다르다. 이 때문에 사실상 전체 주기구간으로는 대표 방향을 정할 수가 없다. 따라서 만약 GMRotD50에 해당하는 스펙트럼을 구할 수 있지만 이에 대한 지진해석을 수행한다는 것은 불가능한 것이다. 이를 위해 회전된 방위각에 대한 기하평균의 의미는 유지하면서 주기에 독립적인 하나의 대표되는 방위각을 결정하는 방법이 개발되었다. 대표가 되는 방위각은 구해진 주기별 기하평균 값들과 가정된 방위각에 대한 기하평균 값의 차이가 관심 주기 구간에 대해서 차이가 최소가 되는 방위각을 선택하는 것이다. 50 백분위수에 대해 이와 같이 구한 스펙트럼은 앞서 제시된 표현방식에서 주기 의존적 특성이 독립적으로 바뀌므로 독립(I)에 대한 기호로 바꾸어서 GMRotI50과 같이 표현한다[3, 4].

#### 2.1.2 최대방향 스펙트럼

감쇄식을 구하는데 이용되는 스펙트럼가속도는 앞서 기술한 기하평균의 방식 중 하나인 경우가 대부분이다. 따라서 감쇄식을 이용하여 도출하는 최대지반가속도를 포함한 주기별 지진재해도곡선(seismic hazard curve)은 방향별로 평균값이라고 할 수 있다. 그러나 내진설계나 지진해석을 하는 경우 이러한 방향별 평균값보다는 응답이 최대가 되는 방향이 중요한 경우가 많다. 주로 모든 방향으로 동일한 강성을 가지는 경우, 즉 면진시스템이나 원형 단면을 가지는 단일 기둥 등은 해당 고유주기에 대해서 최대방향

응답이 발생하는 방향으로 가장 취약하다. 따라서 이 최대응답 방향으로 지진력을 입력하여 해석하여야 하며 이를 위해 응답스펙트럼을 각 주기별로 최대가 되는 방향으로 구하여 구성하는 방법이 개발되었다[5, 6]. 평면상으로 움직이는 집중질량을 가정하여, 즉 직교하는 양 방향으로 독립적인 단자유도 시스템 2개가 합쳐져있는, 사실상 2자유도 시스템을 가정하여 평면 응답 궤적을 구하고 이것이 최대가 되는 방향의 응답값으로 정해지는 스펙트럼을 말한다. 이는 직교하는 양방향에 대하여 각각 단자유도 응답을 수행하고 이 두 응답을 매시간에 대해 벡터 합을 취할 때 최대가 되는 순간에 대한 스펙트럼가속도이다. 이 또한 주기가 다르면 최대가 되는 방향이 달라지기 때문에 주기 의존적인 성격을 가진다. 그리고 응답이 최대가 되는 방향이 정해줄 수 있듯이 응답이 최소가 되는 방향도 정해줄 수 있다. 통상 수평 양방향 입력은 서로 직교하는 방향이기 때문에 최소가 되는 방향은 최대가 되는 방향의 직교방향으로 가정한다.

## 2.2 내진설계기준 및 성능평가방법에서의 수평 양방향 대푯값

### 2.2.1 설계기준

설계지반운동의 세기는 지진재해도 분석으로부터 정해진다. 지진재해도 분석은 대상 부지 주변의 지진 규모에 따른 발생 빈도 및 해당 규모의 지진이 진원에서 발생하였을 때 대상 부지로 전파되는 감쇄식을 고려하여 확률론적으로 조합하여 얻어진다. 감쇄식은 단층운동 특성과 전파 특성을 반영해야 하므로 해당 지역에서 계측된 지반운동 자료로부터 회귀분석을 통해 얻어진다. 따라서 수평지반운동의 주기에 따른 스펙트럼가속도를 방향성을 고려하여 어떻게 정의하느냐에 따라 감쇄식 뿐만 아니라 설계지반운동 스펙트럼에도 영향을 준다.

미국 ASCE 7-05[7]에서 제시하고 있는 수평지반운동 응답스펙트럼은 기하평균 방식에 의해서 정해진 값이며 이는 기본적으로 직교하는 두 수평 성분의 기하평균 값을 취하는 것이다. 이때 기하평균 값은  $GMRotI50$ 로 정의되었다. 그러나 보다 최근의 ASCE 7-10[8] 기준에서는 각 주기별로 응답스펙트럼이 최대가 되는 방향에 대한 스펙트럼가속도[5, 6]로 변환하는 방법을 제공하고 있다.

국내 설계응답스펙트럼은 2017년에 새롭게 개정되어 기준으로 공포되었다. 우리나라의 지진재해도 산출하는 과정에서도 지진동 감쇄식이 필요하지만 우리나라는 계측기록이 많지 않기 때문에 발생 가능한 최대지진 규모를 포괄하는 경험적인 감쇄식을 만들기는 어렵다. 따라서 외국 감쇄식 중 우리나라의 지진환경과 유사한 곳에서 개발된 감쇄식을 많이 차용하며, 그렇기 때문에 기하평균 방식을 기준으로 하는 것이 타당하다. 따라서 설계스펙트럼의 형상을 구하기 위해서  $GMRotI50$  방식으로 얻어진 스펙트럼 형상을 통계분석하여 우리나라 설계응답스펙트럼 형상으로 정하였다[9].

### 2.2.2 성능평가방법

설계에서는 기하평균 스펙트럼이나 최대방향 스펙트럼을 설계기준에서의 대푯값으로 사용하고 그에 적합한 하중조합의 여유도를 부여하여 적용할 수 있다. 그러나 성능평가에서는 여유도가 더해지지 않은 가장 현실적인 지진응답을 산출해야 하기 때문에 실제 지진에서의 수평 양방향 응답을

적절히 고려해야 한다. 즉, 기하평균으로 주어진 지진세기는 다시 수평 양방향의 세기를 달리하여 분해해야 한다. 또는, 최대방향 스펙트럼으로 주어진 경우에는 직교하는 방향에 대해서는 최소방향 스펙트럼을 적용해야 한다. 따라서 내진성능 평가시에는 해당부지의 설계지진이 어떻게 적용되었는지에 따라서 각 방향의 지진 세기를 달리하는 것이 현실적이다. EPRI의 지진취약도 평가보고서[10]에서는 각 구조 형식이 최대방향 스펙트럼에 거동의 영향을 받는지 혹은 방향별로 특정한 기여도로 영향을 받는 것인지 등에 따라 몇 가지 경우로 나누어 이 영향을 고려하였다. 면진구조의 경우는 최대방향 응답에 영향을 받으므로 이를 고려한 평가 방법[11]이 작성되었다. 여기서는 기하평균에 대하여 센 방향의 지진 세기 비를 알면 최대축 방향의 지진세기는  $F_h$ 배로 하고 직교하는 방향의 지진세기는  $1/F_h$ 로 가정한다. 이  $F_h$ 를 확률변수로 가정하여 기하평균 값은 1배가 되도록 유지하면서 방향별 크기가 고려된 양방향 입력지반운동으로 변환한다.

## 3. 국외 강진 계측지진의 적용 예

각 방향별 조합 방법에 대해서 그 값의 차이를 비교해보기 위해 실제 계측된 수평 양방향 지진파를 선택하여 계산하였다. Fig. 1은 대상 지진파인 1940년 Imperial Valley 지진의 El-Centro 관측소의 가속도 시간이력이다. 양방향의 최대지반가속도는 0.215 g 및 0.313 g이다. 이를 통해 각 방법에 따른 5% 감쇠비에 대한 스펙트럼을 도출하였다.

이로부터 각 계측방향에 대한 응답스펙트럼과 이를 기하평균을 취한 응답스펙트럼을 그리면 Fig. 2와 같다. 그림에서와 같이 계측된 센서의 방향에 따라 지진세기에 큰 차이를 보이고 있다.

회전된 방위각에 대한 기하평균 스펙트럼은 앞서 기술한 바와 같이 분포로 나타내어진다. 이 분포를 구하기 위해서 1도씩 증가시키며 90도까지 회전시킨 시간이력에 대해 기하평균 스펙트럼을 구하였고 0%, 16%, 50%, 84%, 100%에 해당하는 백분위수에 대한 기하평균 스펙트럼을 도시하면 Fig. 3과 같다. 기하평균 스펙트럼은 이미 양방향으로 평균적인 값이기 때문에 각 방향에 대한 차이보다 그 분포가 크지 않은 것으로 계산된다.

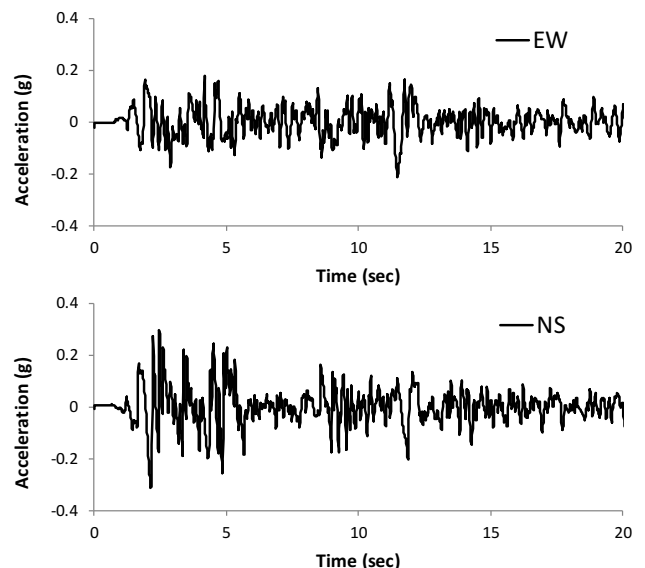


Fig. 1. Acceleration time history of El-Centro ground motion

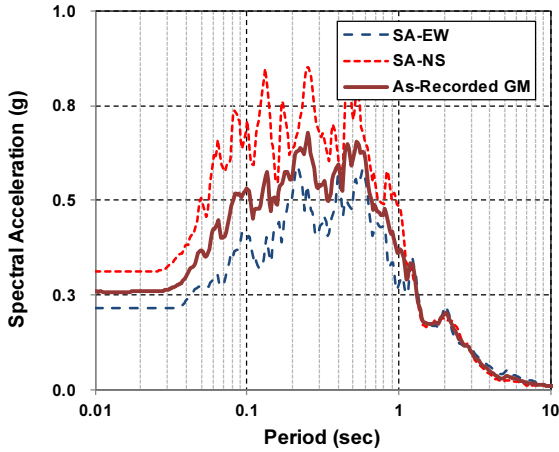


Fig. 2. As-recorded response spectra and geometric mean spectrum of El-Centro ground motion

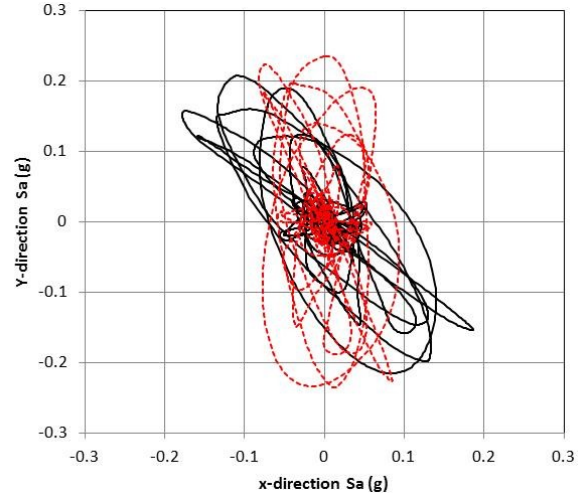


Fig. 5. Spectral acceleration trace of the El-Centro motion for the single degree of freedom system with  $T=2.0$  s and 0.05 damping

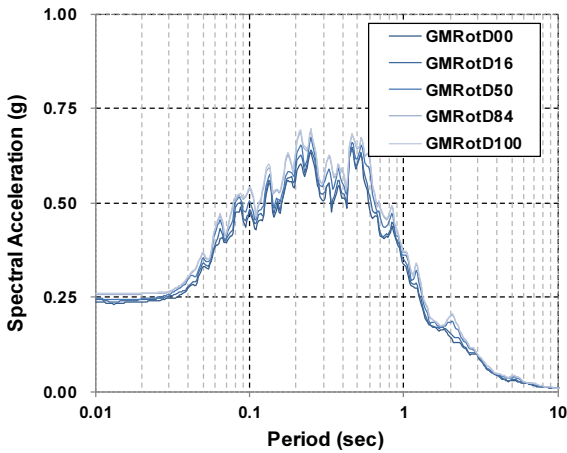


Fig. 3. Distribution of rotated geometric mean spectra

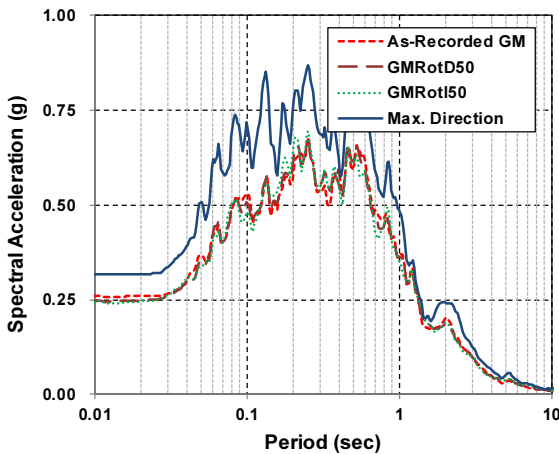


Fig. 4. GM, GMRotD50, GMRotI50,  $SA_{max}$  spectra of El-Centro ground motion

회전된 방위각에 대해서 주기에 독립적인 기하평균 스펙트럼은 50 백분위수에 대해서(GMRotI50) 구하였다. 또한 수평방향 평면응답이 최대가 되는 최대방향 응답스펙트럼( $SA_{max}$ )을 구하였다. 앞서 구한 계측방향에 대한 기하평균 스펙트럼(GM)과 회전된 방위각에 대해서 주기 의존적인 스펙트럼(GMRotD50)을 함께 도시하면 Fig. 4와 같다.

Table 1. List of ground motions and their peak ground accelerations

| Earthquake      | Station | Peak Ground Acceleration (g) |       |       |
|-----------------|---------|------------------------------|-------|-------|
|                 |         | EW                           | NS    | UD    |
| Odeasan (2007)  | DGY     | 0.132                        | 0.156 | 0.065 |
| Gyeongju (2016) | USN     | 0.412                        | 0.430 | 0.213 |
|                 | MKL     | 0.346                        | 0.275 | 0.204 |
|                 | DKJ     | 0.091                        | 0.098 | 0.067 |
| Pohang (2017)   | PHA2    | 0.243                        | 0.271 | 0.140 |
|                 | DKJ     | 0.025                        | 0.048 | 0.043 |
|                 | HAK     | 0.027                        | 0.036 | 0.030 |
|                 | CHS     | 0.021                        | 0.028 | 0.019 |

Fig. 4에서 주기 2초에 대한 값을 보면 기하평균 방식에 비해 최대방향 응답이 차이가 나는 구간이 있다. 이를 확인하기 위해 주기 2초에 대한 2자유도 시스템의 변위응답의 자취를 그려볼 수 있고 이를 스펙트럼가속도로 환산하면 Fig. 5와 같다. 이 스펙트럼가속도의 평면 자취에서 보듯이 센서 방향인 x축과 y축 방향 스펙트럼가속도는 각각 0.214 g와 0.187 g이다. 이를 기하평균으로 계산하면 0.200 g이다. 만약 이 자취를 붉은 점선과 같이 최대방향이 y축과 같은 방향이 되도록 회전시키면 최대방향으로는 0.243 g 이고 이에 수직인 x축 방향, 즉 최소방향으로는 0.125 g가 된다. 이 최대방향과 최소방향에 대한 기하평균은 0.174 g이다. 따라서 이 경우는 방향별로 2배 가까운 차이가 발생하고 기하평균도 계측방향에 대한 기하평균과 차이를 보인다. 즉, 어느 방향 성분을 대표로 하느냐에 따라 스펙트럼가속도 값의 차이가 크게 발생함을 알 수 있다.

## 4. 국내 지진기록의 수평 양방향 응답 특성

### 4.1 국내 지진기록 목록

분석에 사용된 우리나라에서 발생한 지반운동은 최근 내륙에서 발생한 지진기록 중 구조물에 피해를 줄 수 있는 세기를 가지는 3개 지진의 8개 지

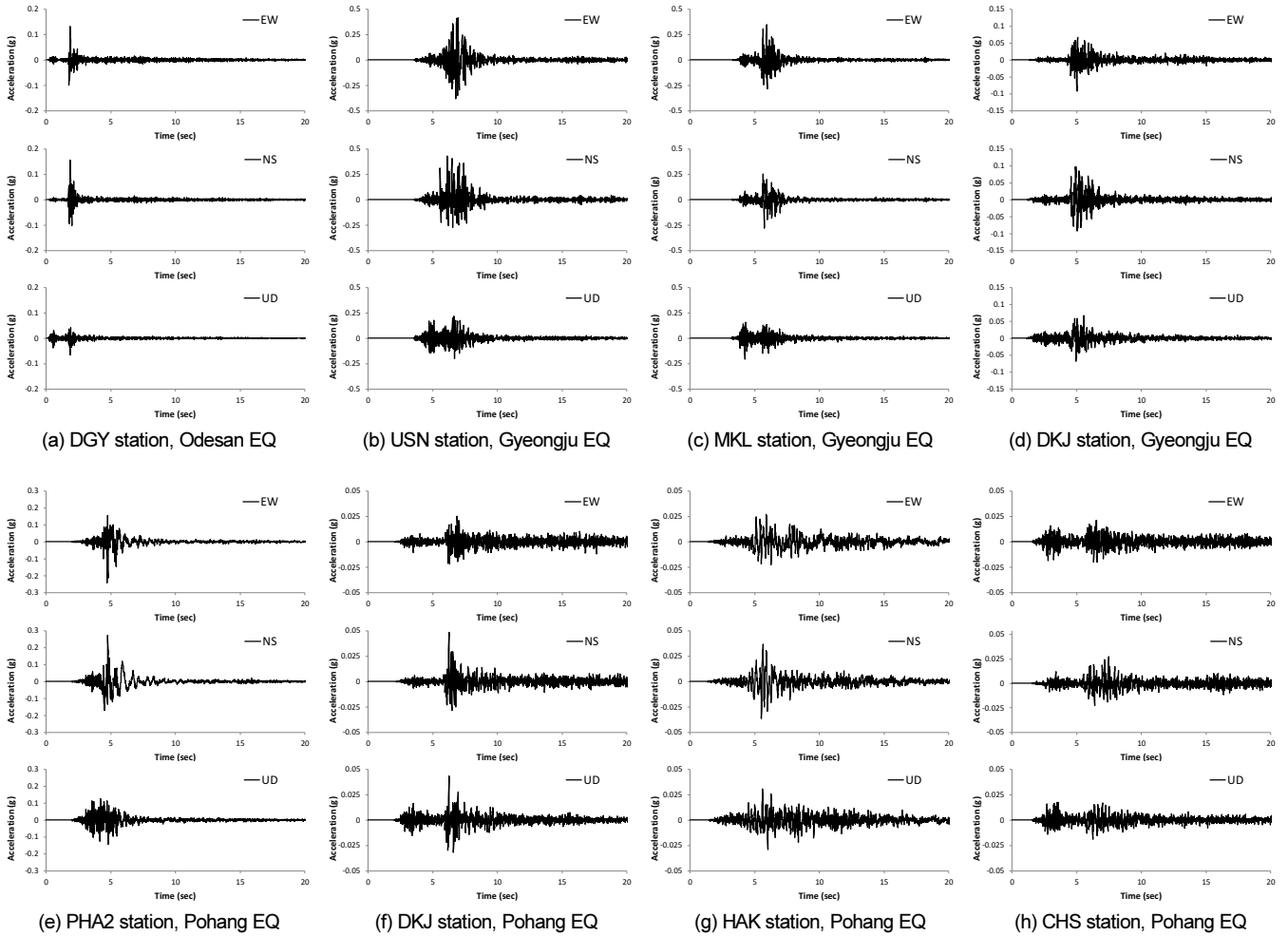


Fig. 6. Time histories of recorded ground motion accelerations

반운동을 선택하였다. 이들은 우리나라에서 기록된 지반가속도 중 최초로 설계값을 넘었던 규모 4.7 오대산 지진에 의한 DGY 계측소를 포함하여, 2016년 규모 5.8의 경주지진에서 3개 관측소, 2018 규모 5.4 포항지진에서 4개 관측소에 대한 지반운동들이다. 이들 목록과 3축방향 각각에 대한 최대 지반가속도 값은 Table 1에 정리되어있다. 각 성분에 대한 지반가속도 시간이력은 Fig. 6에 도시하였다.

#### 4.2 국내 지진기록의 각 방향별 응답스펙트럼

이들 지진기록을 사용하여 다양한 정의에 따른 수평 양방향 스펙트럼을 작성하였다. Fig. 7은 각 지진기록들에 대하여 가속도계 센서가 설치된 방향인 동서(EW), 남북(NS), 상하(UD) 방향에 대한 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 동일한 관측점에서의 수평 양방향 스펙트럼은 차이를 보이고 있고, 예를 들어 경주지진 DKJ 기록의 경우 주기 0.1~1.0 초 사이에서 방향별 차이가 2배 가까이 나는 것을 볼 수 있다. 포항지진 HAK 기록의 경우도 주기 0.2초 부근에서 수평 양방향 중 NS 방향으로만 큰 응답을 보이는 것이 확인된다. 수직방향 스펙트럼은 대체적으로 모든 주기에 대해서 수평방향보다 더 작은 값을 가진다. 그러나 포항지진 DKJ 기록과 같이 일부 구간에서는 수직방향이 더 큰 응답을 보이기도 한다.

#### 4.3 국내 지진기록의 수평 양방향 응답스펙트럼

Fig. 8에는 이들 지반운동에 대해 앞서 기술한 수평 양방향 스펙트럼에 대한 4가지 대푯값 정의에 따라서 계측방향에 대한 기하평균 스펙트럼(GM)과 GMRotD50, GMRot150 및 최대방향 응답스펙트럼(SA<sub>max</sub>)을 도시하였다. 앞서 EI-Centro 지반운동에 대한 스펙트럼의 예에서와 마찬가지로 기하평균 방법을 기반으로 하는 3개의 스펙트럼은 큰 변동성을 보여 주지는 않는다. 그러나 최대방향 스펙트럼은 확연한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 오대산지진 DGY 기록과 같이 전체 주기에 대해서 기하평균 스펙트럼 대비 최대방향 스펙트럼이 거의 유사한 비율로 크게 평가되는 경우도 있고, 경주지진 USN과 DKJ 기록과 같이 특정 주기 구간에 대해서 최대방향 스펙트럼이 확연히 큰 경우도 있다. 기하평균 방식에 비해서 최대방향 값이 스펙트럼의 요철이 더 심하고 극부적인 최대값들이 많이 나타나며 이는 기하평균이 양방향의 평균적인 개념이기 때문에 자연스러운 결과이다. 오대산지진 DGY 기록의 NS 성분은 최대지반가속도만 고려하였을 때 0.156 g로 당시 지반등급 분류에서 S<sub>B</sub> 지반에서의 1등급 구조물에 대한 설계지진 가속도인 0.154 g를 넘었다. 특히 PGA가 최대방향이 되도록 회전시킨 값은 0.185 g로 약 20%를 상회하였다. 그러나 계측방향에 대한 기하평균으로 산정하면 0.143 g이고 GMRotD50은 0.127 g, GMRot150은 0.133

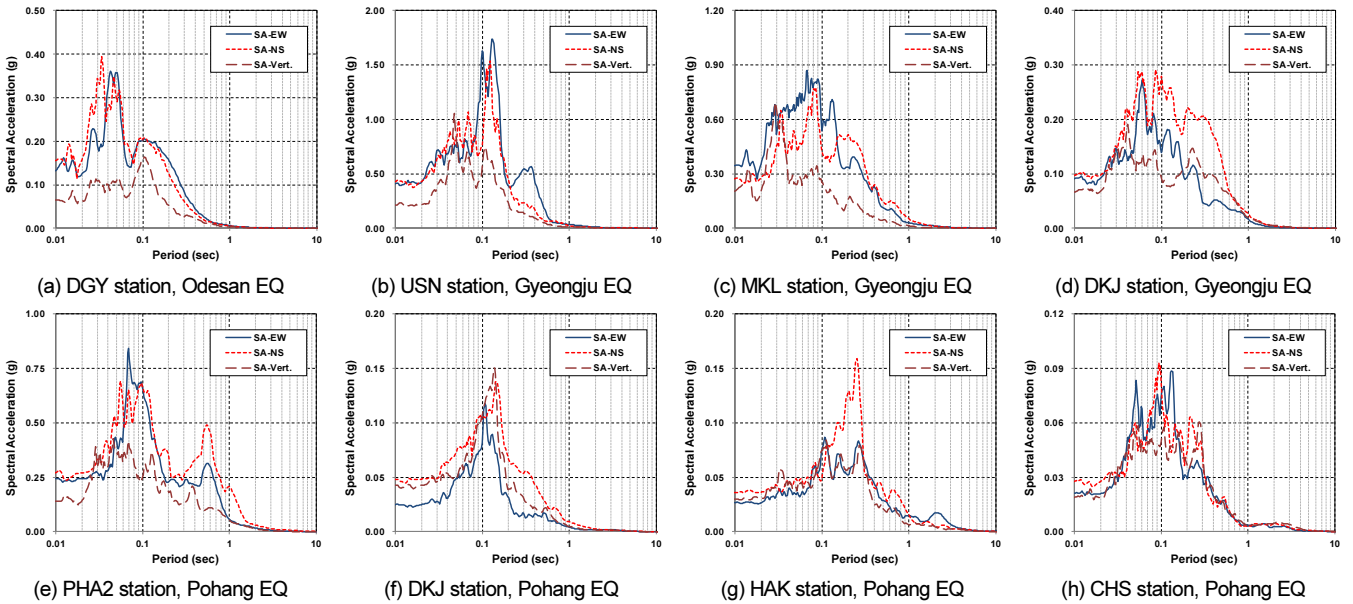


Fig. 7. As-recorded response spectra of two horizontal and vertical directions

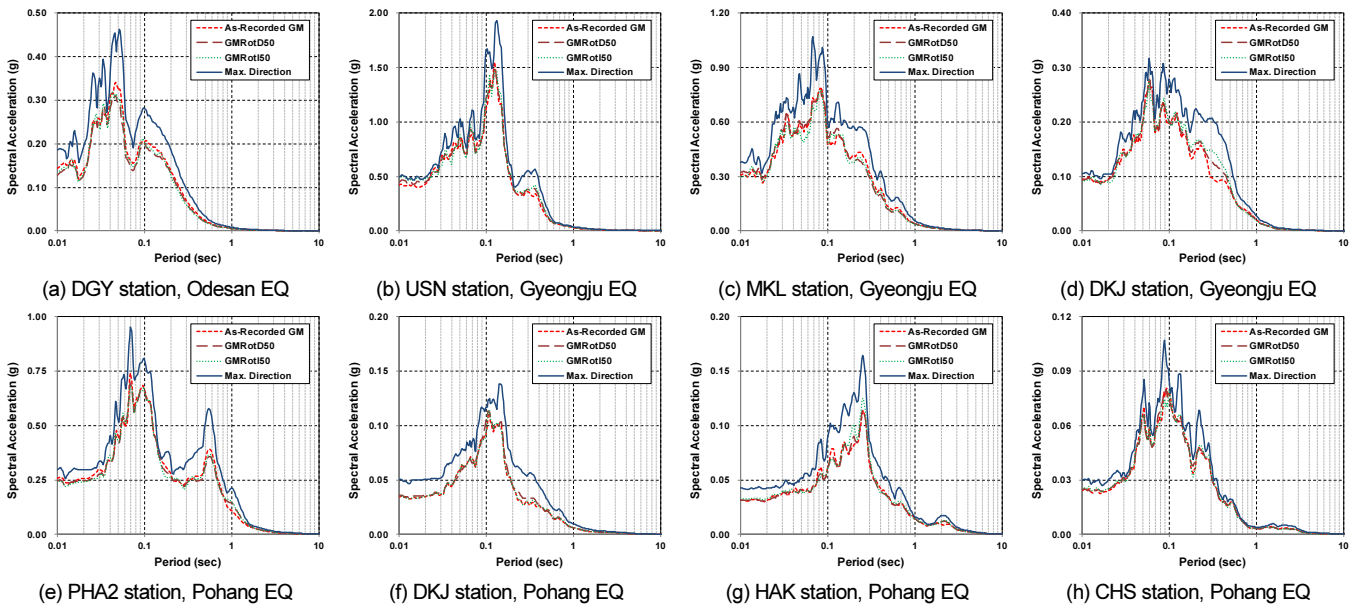


Fig. 8. Geometric mean and maximum directional response spectra of two horizontal directions

g로 계산된다. 따라서 이 경우 설계지진가속도를 초과했다고 할 수 있는지는 논의가 필요하다. 마찬가지로 다른 계측기록들도 수평 양방향 성분을 명확히 정의하여 설계지진 세기 등과 비교할 필요가 있다.

기하평균 방식에 대해서는 서로 큰 차이를 보이지 않는다. 기존 강진지역 기록에 대한 연구에서는 GMRot150은 주기에 독립적인 하나의 방향에 대해서 결정이 되므로 결정된 방향 이외의 방위각에 대해서는 GMRotD50에 비해 약간의 시스템 오차를 가져서 7% 정도 더 크게 계산된다고 알려져 있고[12] 국내 지반운동 결과에서도 크게 두드러지지는 않지만 약간 차이를 보이고 있다. 최대방향 스펙트럼은 기하평균 스펙트럼들과 차이가 크며 앞서 기술하였듯이 최대방향 응답은 주기마다 다른 방향이 될 수 있기 때문에 이 방향에 대한 분석이 필요하다. Fig. 9에서는 최대방향 응답이 발생하도록 회전시킨 각도를 주기에 대한 값으로 나타낸 것이다. 최대방향 발생

하는 각도의 범위는 0°~360° 사이가 되지만 180° 차이가 발생하는 경우는 방향이 반대인 것을 나타내는 것이며 단자유도 응답을 구하는 과정에서 절대값의 최대값을 취하기 때문에 차이가 없는 것으로 봐도 무방하다. 따라서 이 그래프는 180° 차이가 발생하여 그래프가 불연속이 되는 부분이 나타나면 이를 180° 보정하여 연속적인 곡선이 되도록 표현하였다. Fig. 8에서의 오대산지진 DGY 기록과 같이 전체 주기 구간에 대해서 기하평균 스펙트럼과 최대방향 스펙트럼의 차이가 유사한 경우는 지진파의 주기 성분이 양방향으로 차이가 거의 없고 세기만 일정하게 다른 경우이기 때문에 최대방향 발생하는 회전각도 주기에 따라 큰 변화 없이 일정하다. 그러나 특정 주기에 대해서 차이가 큰 경우 그 주기 값을 기준으로 주기가 바뀔 때 따라 최대방향도 다소 회전하며 변하는 것을 알 수 있다. 즉, 특정 주기에서만 방향별로 뚜렷한 세기의 차이가 있는 경우 최대방향 응답이 도출되도록 방향

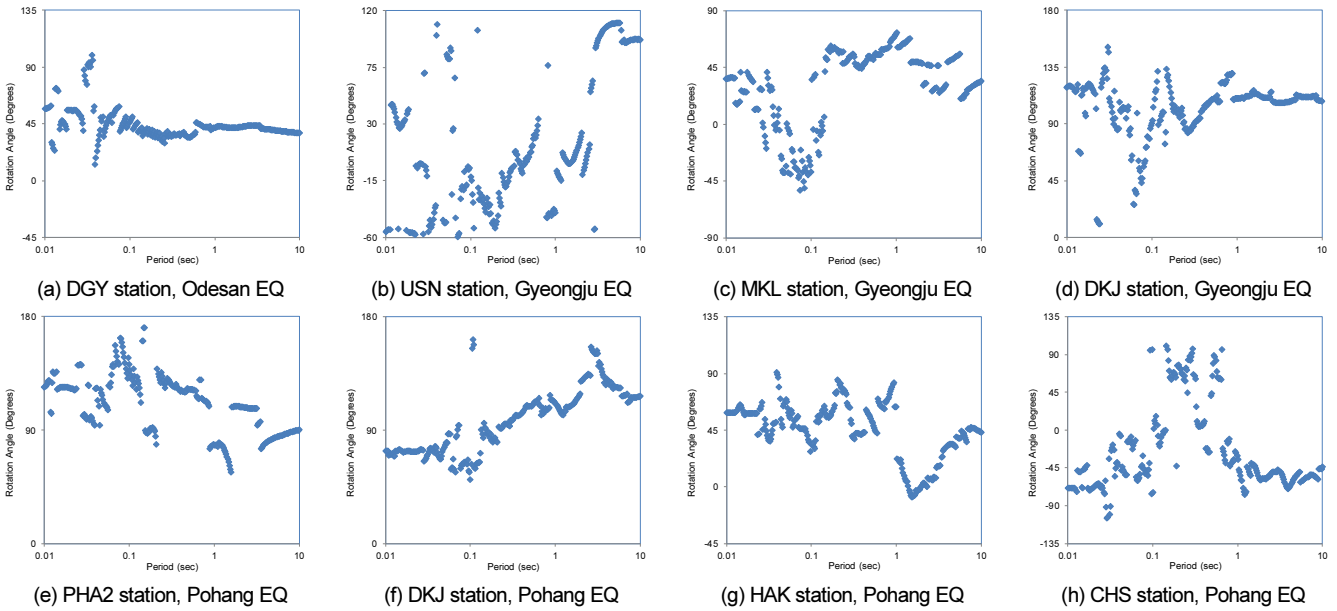


Fig. 9. Angle of maximum directional response with regard to period

각 선정하는데 있어서 해석하고자 하는 구조물의 주기와 연계하여 판단하는 과정이 필요하다.

## 5. 국내 지진의 수평 양방향 응답스펙트럼 통계

### 5.1 주기별 응답스펙트럼 차이 통계

스펙트럼 상에서 단자유도시스템의 응답변위를 구하는 방식은 1축방향 입력지진에 의한 것만 고려된다. 그러나 실제로 시스템의 거동은 수평 2축 방향 입력지진에 의하여 평면상에 궤적을 그리며 움직이고 이 경우 최대 응답변위는 매 시간단계마다 두 방향의 벡터합을 계산하여 가장 최대가 되는 변위로 택해야 한다. 설계응답스펙트럼은 수평 양방향으로 동일한 세기를 가지고 있다고 가정하기 때문에 충분한 강진지속시간을 가지는 경우 양방향 응답이 동시에 최대가 되는 순간이 존재할 수 있어서 2축방향 최대 응답 변위는 1축방향 최대응답 대비  $\sqrt{2}$  배까지 될 수 있다.

Fig. 10은 8개 지반운동에 대한 GMRotI50 스펙트럼 대비 최대방향 스펙트럼의 비율을 도시한 것이다. 기하평균 세기가 아무리 크더라도 최대방향 세기보다는 클 수 없으며 기하평균의 수평양방향 성분이 동일한 경우만 1.0이 되기 때문에 이 그래프는 1보다 큰 값을 가진다. 설계에서처럼 만약 수평 양방향 성분의 세기가 동일하다면 최대방향은  $\sqrt{2}$  배 만큼 큰 경우가 최대일 것이다. 그러나 실제로는 수평 양방향 성분의 세기가 동일하지 않기 때문에 기하평균값 대비 최대방향의 비가 이를 넘어갈 수 있으며 그림에서와 같이 2배에 이르는 경우도 있다. 8개 지반운동에 대한 비율의 평균값도 이 그래프에 함께 도시하였다. 고진동수 영역에서는 상대적으로 최대방향 지진응답이 기하평균에 비해 크지 않으며 약 1.2 정도의 비율을 가진다. 그러나 0.1초~0.5초 사이 주기 구간에서 이 비율은 증가하여 0.5초 이상에서는 약 1.4 정도의 비율을 가진다. 이는 고진동수 단자유도 응답은 상대적으로 많은 응답 사이클을 가지기 때문에 어느 방향으로나 다수의 최대치가 발생하여

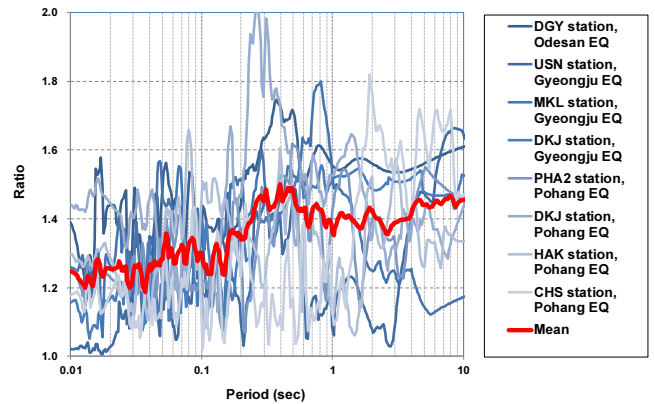


Fig. 10. Ratio of maximum directional SA to GMRotI50 SA

어느 한순간만 최대방향응답이 생기는 장주기 구간보다 그 간섭성(coherency)이 약하기 때문으로 판단된다. 반면에 지진파는 1초 내외를 기준으로 그 이상의 주기 구간에서는 간섭성이 커지기 때문에 한 쪽방향으로만 크게 응답이 발생하는 경우가 많다. 랜덤성을 띄는 지진파의 고주파 성분과는 달리 장주기 성분은 지진원 메카니즘에 의해 영향을 받기 때문에 수평 양방향 성분이 큰 간섭성을 가질 수 있으며 이 경우는 기하평균과 최대방향의 차이가 커질 수 있다.

국의 강진기록에 대한 연구들에서도 이러한 기하평균 대비 최대방향의 주기별 스펙트럼가속도 비가 지진규모와 거리에 따라 연구가 되었다[13, 14]. 이들 연구에서는 단주기 영역에서는 이 비가 1.2 내외의 값을 가지며 주기가 증가할수록 비가 증가하여 1.3~1.35에 이르렀다. 우리나라에서 계측된 경우 그 비가 1.4 정도로 보다 큰 값에 이르렀으며 이는 장주기 성분의 방향성이 보다 뚜렷이 나타났음으로 판단할 수 있다. 또한 단주기와 장주기의 비율이 달라지는 구간이 주기 약 0.2초 내외로 1초 내외로 바뀌는 국외 지진 연구 결과에 비하여 더 작은 주기에서 발생함을 알 수 있다. 이는 국내 계측기록이 상대적으로 작은 규모의 지진이기 때문이기도 하고 판내부지

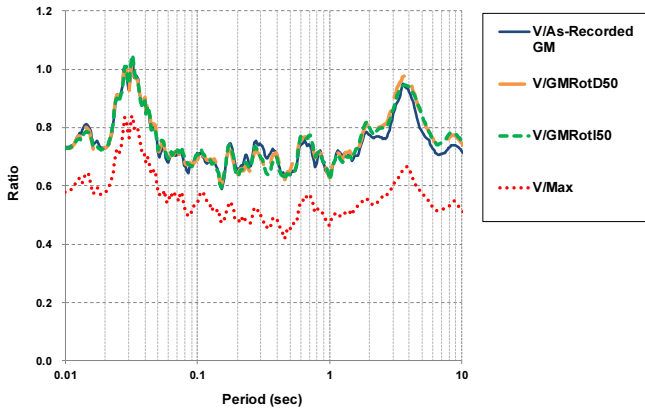


Fig. 11. V/H ratio according to various definition of horizontal SA

진이어서 단주기와 장주기를 구분하는 영역이 보다 고진동수로 이동하기 때문이라고 생각된다.

### 5.2 수평방향 스펙트럼에 대한 수직방향 스펙트럼 비

Fig. 11은 수평방향 스펙트럼에 대한 수직방향 스펙트럼의 주기에 따른 비율(V/H 비)을 8개의 지반운동에 대해 평균하여 도시한 것이다. 기하평균 기반으로 하는 세 가지 수평스펙트럼(GM, GMRotD50, GMRotI50)은 그 값에 큰 차이가 없기 때문에 각각의 V/H 비가 크게 차이가 없다. 수직방향 스펙트럼이 동일하기 때문에 최대방향 스펙트럼에 대해서는 V/H 비가 기하평균 방식에 비해 줄어들 수밖에 없게 된다. 수직스펙트럼들에 대한 기준 들처럼[1, 2] 고진동수 성분은 V/H 비가 1에 가깝게 된다는 것이 여기에서도 마찬가지로 보여진다. 기하평균에 대한 V/H 비는 국내 설계기준[15]에서 제시하고 있는 0.77값과 유사하다. 그러나 만약 최대방향 스펙트럼을 사용한다면 그 비는 0.6 내외로 떨어질 수 있다. 특히 주기 0.5초 부근에서는 최대방향 스펙트럼이 수평양방향 성분의 V/H 비가 0.5 이하로 평가되었다. 따라서 내진설계 및 성능평가시 수평양방향 성분의 정의 방법과 관심 주기 영역에 따라서 V/H 비를 적절히 고려해야 한다.

이 결과에서 보여준 통계적 특성은 국내의 유의미한 데이터 수가 많지 않기 때문에 8개의 한정된 개수로부터 얻어진 것임은 유의해야 한다. 수평방향 기하평균 값에 대한 최대방향 값의 통계는 국외 강진기록 결과와 유사한 경향을 보인다. 하지만 수평방향 대비 수직방향 비율은 일부 주기 구간에서 큰 값으로 평가되는 등 일정하지 않은 변화가 있기 주기별 경향보다는 평균적인 값만 참조할 수 있을 것이다. 또한, 중규모 수준의 데이터만 사용하였기 때문에 설계에서 최대 지진 규모로 고려하는 규모 6 이상의 지진특성은 반영할 수 없었다. 이는 우리나라와 유사한 지진환경을 가진 지역에서 계속된 강진기록을 활용하여 보충할 수 있을 것이다.

## 6. 결론

이 연구에서는 수평 양방향 입력지진을 응답스펙트럼으로 표현할 때 어떠한 방식을 사용하는지에 대한 소개와 실제 국내에서 계속된 지반운동을 대상으로 평가해 보았다. 기하평균 방식에 의한 스펙트럼은 대체로 유사한

결과를 내었고 최대방향 스펙트럼은 상당한 차이를 보임을 알 수 있었다. 특히 최대방향 스펙트럼은 주기에 따라서 그 세기가 달라지는 경향을 확인하였다.

양방향 스펙트럼의 세기를 고려하면 구조물의 약축과 강축의 조건에 따라서 그 응답이 매우 달라질 수 있다. 약축으로 큰 세기의 지진입력을 넣는다면 구조물이 매우 취약한 것으로 평가될 것이고 반대라면 다른 결과를 낼 것이다. 따라서 실제 지진 세기의 방향별 세기가 조합 가능한 모든 방향에 대해서 고려되어야 그 안전 여유도를 평가할 수 있다. 이를 위해서는 방향별 지진세기의 분포 함수 도출하고 구조물의 취약 방향에 대한 파괴기준을 정의하여 방향별 조합에 따른 구조물의 취약도를 확률적으로 분석할 필요가 있다.

양방향 지진의 세기 차이를 고려하거나 안 한 경우 모두 동일한 기하평균을 만족하지만 방향별 지진 세기의 차이가 고려된 스펙트럼에 의한 결과는 중간값뿐만 아니라 분포도 커지게 될 수 있다. 이는 내진설계나 성능기반 지진응답 평가시 중간값이 아닌 안전측의 결과값을 선택하기 때문에 최종 결과에 큰 차이를 보일 수 있다. 또한 이러한 방향별 세기의 차이는 지진시 신속히 정지를 시켜야 할 필요가 있는 시스템에 대해서 논의가 필요한 문제를 일으킨다. 원전이나 고속철도 등은 어느 지진동 수준 이상 계측이 되면 자동으로 정지가 되도록 설정되어 있다. 그러나 이 기준이 계측기를 수평 양방향에 대해 설치하더라도 어느 방위각으로 하느냐에 따라서 동일한 지진동에 대해 기준값을 넘을 수도 있고, 그렇지 않을 수도 있다. 극단적으로는 최대방향 세기의  $1/\sqrt{2}$ 에 해당하는 세기만 계측이 될 수도 있다. 따라서 기준 적용을 위한 보다 명확한 정의가 필요하다.

이 연구에서는 주기별로 수평방향에 대한 수직방향 세기의 비율도 계산하였다. 기하평균 스펙트럼에 대한 수직방향 스펙트럼의 비율은 국내 내진설계 기준에서 정하고 있는 0.77과 유사하다. 다만 수평스펙트럼을 최대방향 스펙트럼으로 정의한다면 이 세기는 달라져야 할 것이다.

이 연구에서는 우리나라에서 계속된 몇몇 지반운동만을 대상으로 하여 결과에는 다소 제약이 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 지진세기를 평가하는 방법과 지진응답 해석 및 설계를 위한 방법에 대한 차이를 명확히 하는데 도움이 될 수 있다. 향후 많은 지진기록이 확보되면 보다 통계적으로 안정적인 결과를 제시할 수 있을 것이며 이를 바탕으로 현실적이고 안전한 내진설계에 기여할 수 있다.

### / 감사의 글 /

본 연구는 2017년도 부산대학교 기본연구지원사업에 의한 연구임.

### / REFERENCES /

1. NRC. Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Revision 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, c1973.
2. FEMA, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, FEMA P-750/2009 Edition, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, c2009.
3. Boore DM, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA. Orientation-



- Independent Measures of Ground Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006;96:1502–1511.
4. Kenneth W, Bozorgnia Y. Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 2008;24(1):139–171.
  5. Huang Y, Whittaker AS, Luco N. Maximum Spectral Demands in the Near-Fault Region, *Earthquake Spectra*, 2008;24:319–341.
  6. Huang Y, Whittaker AS, Luco N. Orientation of Maximum Spectral Demand in the Near-Fault Region, *Earthquake Spectra*, 2009; 25(3):707–717.
  7. ASCE Standard, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7–05, c2005.
  8. ASCE Standard, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7–10, c2010.
  9. Kim JK, Kim JH, Lee JH, HeoTM, Development of Korean Standard Horizontal Design Spectrum Based on the Domestic and Overseas Intra-plate Earthquake Records, *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2016;20(6):369–378.
  10. EPRI, Methodology for Developing Seismic Fragilities, EPRI TR–103959, Electric Power Research Institute, c1994.
  11. Huang Y, Whittaker, AS, Kennedy RP, Mayes RL, Assessment of Base-Isolated Nuclear Structures for Design and Beyond-Design Basis Earthquake Shaking, Technical Report MCEER–09–0008, Buffalo NY: MCEER, c2009, 136 p.
  12. Boore DM, Orientation-Independent, Non Geometric Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010;100(4): 1830–1835.
  13. Boore DM, Kishida T, Relations between Some Horizontal-Component Ground-Motion Intensity Measures Used in Practice, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017;107(1):334–343.
  14. Jennie A, Watson-Lamprey J, David MB, Beyond SaGMRotI: Conversion to SaArb, SaSN, and SaMaxRot, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007;97(5):1511–1524.
  15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Seismic Design Code, Korean Design Standard, KDS 17 10 00, c2018.