

## 미소지진 계측기록을 이용한 사력댐 고유진동수 산정

### Evaluation of Fundamental Frequency of Rockfill Dam using Microearthquake Records

하익수<sup>1)</sup>, Ik-Soo Ha, 이종욱<sup>2)</sup>, Jong-Wook Lee, 오병현<sup>3)</sup>, Byung-Hyun Oh

<sup>1)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher, Dam Safety Research Center, Korea Institute of Water and Environment (KIWE), Kwater

<sup>2)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher, Dam Safety Research Center, Korea Institute of Water and Environment (KIWE), Kwater

<sup>3)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 소장, Director, Dam Safety Research Center, Korea Institute of Water and Environment (KIWE), Kwater

**SYNOPSIS :** The purpose of this study is to evaluate the fundamental frequency of the dam by the various methods using real microearthquake records which were measured on 'H' dam site and to compare each results. In this study, the fundamental frequency was evaluated by the frequency analysis of the microearthquake records which were measured on the dam crest, by the evaluation of acceleration amplification ratio between the foundation and the crest of dam, and by the evaluation of acceleration response spectrum ratio between the foundation and the crest of dam, respectively. Among these methods, it was found that the method by the evaluation of acceleration response spectrum ratio between the foundation and the crest of dam was the most effective method. But, if the simple engineering judgement can be considered, it was thought that the all three methods could reasonably evaluate the fundamental frequency of the dam.

**Key words :** fundamental frequency, microearthquake record, earthquake, rockfill dam

## 1. 서론

댐의 지진계 설치는 일반적으로 지진시 댐의 응답특성을 분석하여 내진설계에 반영하고, 댐 지역의 지진동 특성 예측 등 지진에 대한 댐 안전관리를 위하여 행해지고 있다. 다른 구조물에 비해 그동안 댐에 대한 지진계 설치는 활발히 이루어지지 않아 댐 부지의 지진 계측기록을 활용할 수 없었으나, 최근 지진발생 증가와 대형구조물에 대한 지진응답특성 파악에 대한 요구로부터 그 필요성이 증대되고 있다.

댐의 지진계 설치는 댐설계기준(2005)에 반영되어 있고, 내진특등급으로 분류된 댐의 경우는 지진계 설치가 의무화되어 있다. 그림 1처럼 댐의 지진계 설치위치는 총 7개소로 구분할 수 있으나, 필요에 따라 2개소 이상 설치하는 것을 기본으로 하고 있다. 또한 지진계 설치방법은 댐의 형식에 따라 다양하기 때문에 대상 댐에 대한 정밀조사를 실시한 후 설치해야 한다. 대부분의 댐의 경우 지진시 응답특성을 관찰하기 위하여 그림 1의 댐 단면에서 댐 마루(2), 댐 2/3지점(4), 댐 하단(1)에 설치하는 것을 기본적인 방법으로 채택하고 있다.

사력댐의 고유진동수 산정은 지진발생시 댐의 거동을 근사적으로 예측할 수 있는 기초자료를 제공할 뿐만 아니라, 수치해석을 이용하여 지진발생시 댐의 거동을 평가하고자 할 때, 입력물성 및 해석결과의

적정성을 평가할 수 있는 유용한 참고자료로 활용될 수 있다. Mejia 등은 지진계측기록을 이용하여 산정한 댐 고유진동수와 사력재료의 물성을 변화시키면서 수행한 수치해석으로 산정한 고유진동수를 비교함으로써 사력재료 물성을 역산한 바 있다(Mejia 등, 1982). Mejia 등은 주파수대역에서 댐 저부에서의 가속도 크기와 댐 중앙 정상부에서의 가속도 크기의 비를 증폭함수(amplification function)로 정의하고, 댐 고유진동수는 댐 중앙 정상부에서의 가속도 증폭함수의 첨두값(peak)으로부터 산정하였다.

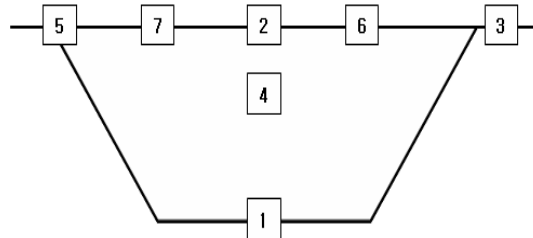


그림 1. 댐 지진계 설치 위치

본 연구에서는 2006년 1월 강원도 영월의 동쪽 20km 지점에서 발생한 규모 M3.2 지진에 대해 진앙 지로부터 약 77km 떨어진, 현재 운영 중인 댐 부지에서 관측된 미소지진기록을 활용하여 다양한 방법을 이용하여 댐 고유진동수를 산정해 보았다. 고유진동수 산정을 위해 이용된 방법들은 댐 정상부 자유진동기록 분석에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법이다.

본 연구의 목적은 운영 중인 댐 부지에서 관측된 미소지진기록을 활용하여 다양한 방법들로부터 댐 고유진동수를 산정하고 그 결과를 비교·검토하는데 있다.

## 2. 댐 부지 지진계측 현황

### 2.1 대상댐 개요

지진기록이 계측된 H댐은 강원도 횡성에 위치한 다목적댐이다. H댐의 제원은 높이 48.5m, 총저수용량은 86백만 $m^3$ 으로서 댐설계기준(2005)에 의해 내진특등급으로 분류되며, 설계진도는 0.098g이다. 그림 2는 H댐의 대표단면을 나타낸 것이다. H댐에는 그림 3과 같이 댐 정상부, 댐 하류사면 하단, 어버트(abutment)에 각각 1개씩 총 3개의 지진계가 설치되어 있다.

### 2.2 지진계측 개요

본 연구에서 이용한 지진계측기록은 2006년 1월 19일 강원도 영월군 동쪽 20km 지점(진앙, 위도 37.21, 경도 128.8)에서 발생한 규모 3.2(진도 II-동해, 영주, III-영월, 태백, 정선)의 지진(진앙지 위치 그림 4 참조)으로 H댐의 지진계에 감지된 기록이다. 그림 5는 댐 abutment에서 관측된 지진파의 특성을 보여주는 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 관측된 지진가속도의 최대크기는 미소하고 지진파의 주파수 특성은 저주파와 고주파가 고르게 분포하는 특성을 보였다. 본 댐에서 계측된 지진파형 기록을 분석한 결과 최대가속도는 0.0001 ~ 0.00197g를 나타내고 있어 설계진도인 0.098g와 비교하여 매우 작은 수치를 나타내고 있으나, 계측기록을 분석한 결과 댐 마루(0.0015~0.0019g), 암반노두(0.0001~0.0003g), 댐 하류사면(0.0006~0.0008g)에 각각 계측된 기록이 댐 상부로 갈수록 증폭현상을 나타내고 있는 일반적인 댐에서의 관측기록과 비슷한 결과를 나타내었다.

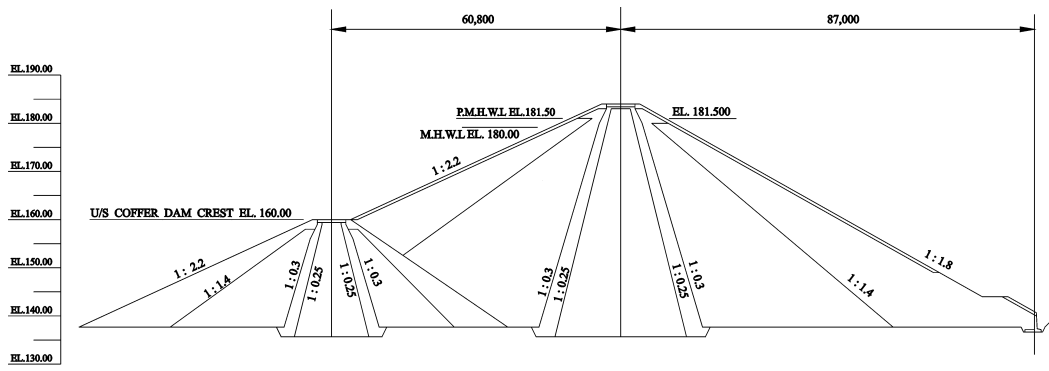


그림 2. H댐 대표단면

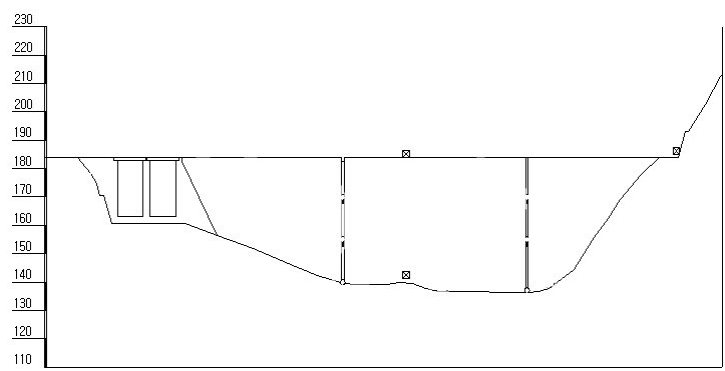


그림 3. H댐 지진계 설치 위치

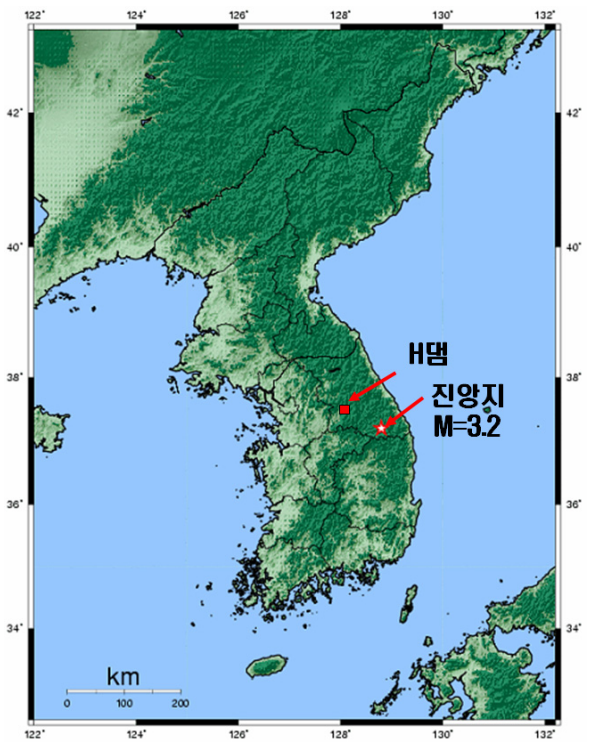
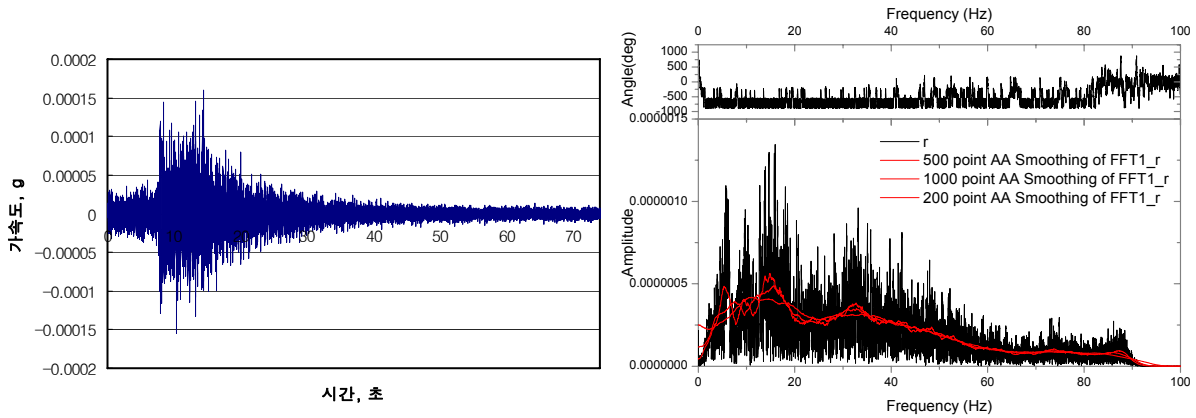


그림 4. 발생 지진 및 H댐 위치



(a) 가속도 시간이력 (b) 가속도 fourier spectrum

그림 5. 댐 부지 어버트(abutment) 계측지진 기록

### 3. 계측기록을 이용한 댐 고유진동수 산정

#### 3.1 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법

댐 정상부의 자유진동 기록 분석에 의한 방법이란, 그림 6과 같이 댐 정상부에서 관측된 지진기록 중 주진동(main event) 후 자유진동에 의한 파형부분을 일부분 발췌하여 그림 7과 같이 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 수행하여 주파수영역에서 푸리에진폭(Fourier Amplitude)이 첨두값(peak)으로 나타나는 지배주파수(predominant period)를 산정하고 이로부터 지배진동수(predominant frequency)를 산정하고 이를 고유진동수(fundamental frequency)로 간주하는 방법이다.

그림 7로부터 H댐의 정상부 자유진동에 의한 지배주파수는 0.36sec, 즉 지배진동수는  $1/0.36=2.78\text{Hz}$ 로서 고유진동수는 2.78Hz로 산정되었다.

#### 3.2 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법

댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법이란, Meija 등(1982)이 사용한 방법과 동일한 방법으로 주파수대역에서 댐 저부에서의 가속도 크기와 댐 중앙 정상부에서의 가속도 크기의 비를 증폭함수(amplification function)로 정의하고, 댐 고유진동수는 댐 중앙 정상부에서의 가속도 증폭함수의 첨두값(peak)으로부터 산정하는 방법이다. 다만, 본 연구에서는 댐 저부에는 지진계가 설치되지 않아 저부에서의 계측기록을 얻을 수 없었던 이유로, 어버트에서의 기록을 댐 저부에서의 기록으로 간주한 점에서 상기 방법과는 다소 차이가 있다.

그림 7은 이러한 방법으로 산정된 결과를 나타낸다. 그림에서 0.2sec이하(주파수로는 5Hz 이상)에서 상당히 큰 여러 개의 첨두값이 보이는데 20m이상 대댐 중 필댐(사력댐과 흙댐)의 고유진동수는 5Hz 미만이라는 기존의 연구결과(Okamoto, 1984)를 고려한다면, 그림으로부터 첨두주기는 0.36sec, 즉 2.78Hz로 고유진동수를 산정할 수 있다.

#### 3.3 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법

댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법이란, 일정감쇠비(본 연구에서는 5% 감쇠비 사용)에 대한 댐 저부와 정상부에서의 가속도 계측기록의 응답스펙트럼을 각각 구한 후(그림 9 참조), 댐

정상부 응답스펙트럼을 댐 저부 응답스펙트럼으로 나눈 응답스펙트럼비를 산정하고, 산정된 응답스펙트럼비에서 첨두값을 보이는 주기를 산정하고 산정된 주기값으로부터 고유진동수를 산정하는 방법이다(그림 10).

그림 10으로부터 응답스펙트럼비가 최대가 되는 주기는 0.36sec임을 알 수 있고, 이로부터 산정된 고유진동수는 2.78Hz이었다.

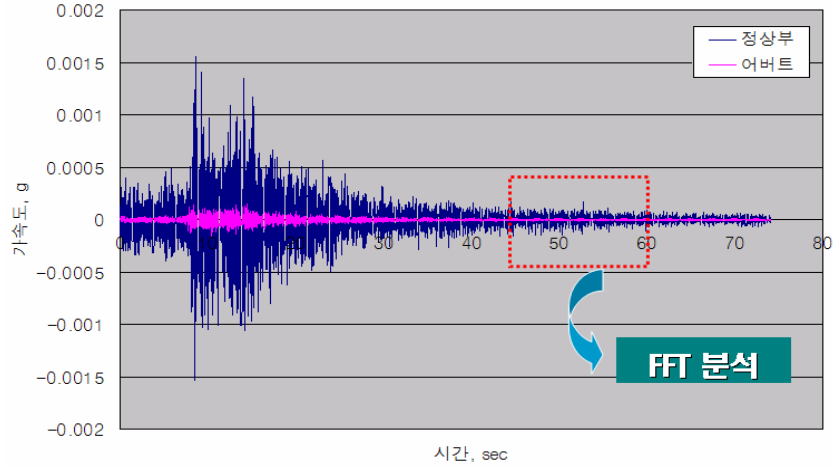


그림 6. 댐 정상부 계측기록으로부터 자유진동 기록 발체

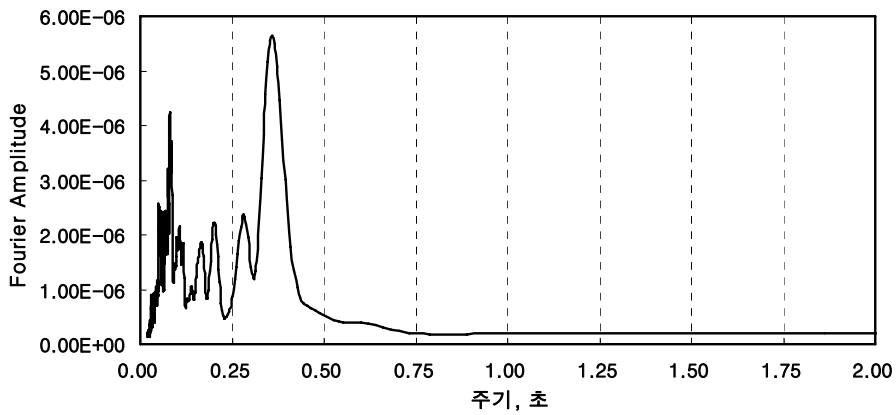


그림 7. 댐 정상부 자유진동파형의 FFT 분석 결과

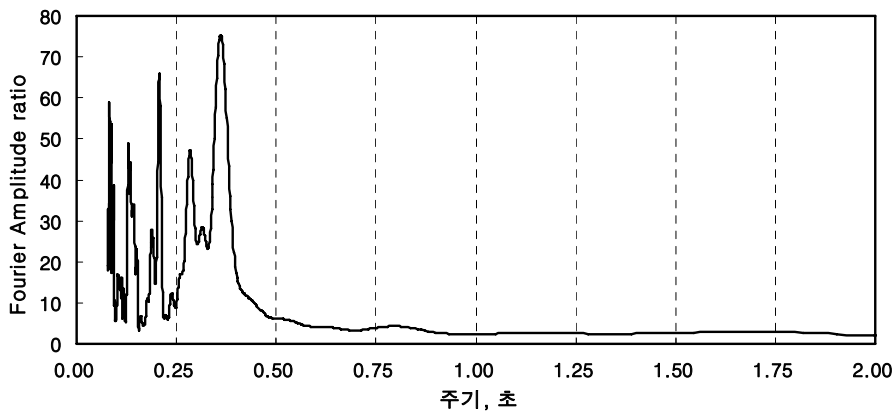


그림 8. 댐 저부로부터 정상부 가속도 증폭비 산정결과

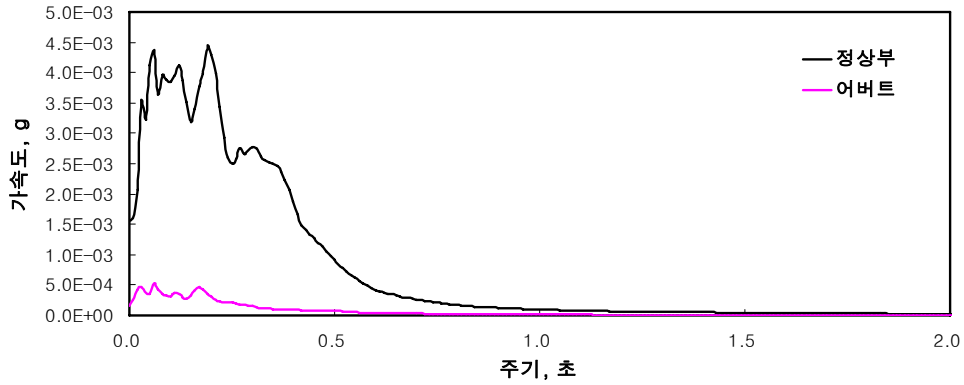


그림 9. 관측지진기록의 응답스펙트럼

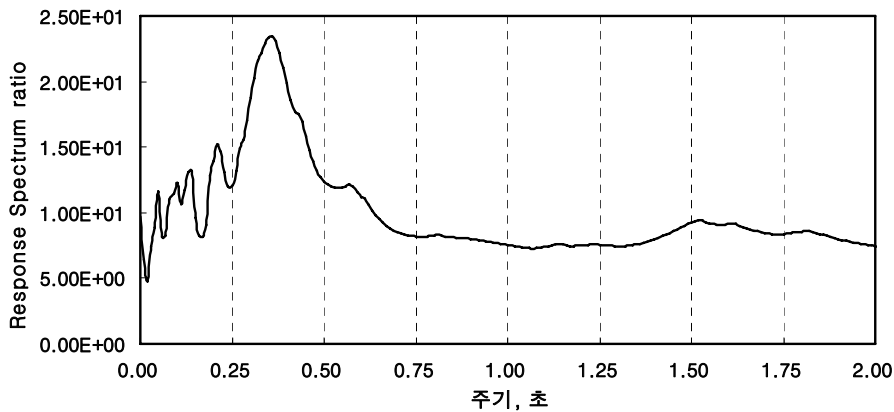


그림 10. 응답스펙트럼비(정상부응답스펙트럼/어버트응답스펙트럼) 산정 결과

### 3.4 고유진동수 산정 결과 비교

실제 운영 중인 H댐 부지에서 계측된 미소지진기록을 활용하여 댐 정상부 자유진동기록 분석에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법으로 H댐의 고유진동수를 산정한 결과는 모든 경우 2.78Hz로 동일한 값으로 산정되었다. 다만, 댐 정상부 자유진동기록 분석에 의한 방법은 주진동(main event) 후 자유진동에 의한 기록 발취가 임의적일 수 있다는 오차를 가지고 있다. 또한, 댐 정상부 자유진동기록 분석에 의한 방법과 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법의 경우에는 낮은 주기에서 여러 첨두값들이 나타나서 0.2sec(5Hz에 해당) 주기이하의 첨두값은 무시하는 공학적 판단이 필요하였다. 이에 비해 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법은 첨두값이 명확하게 표시되어 상대적으로 두 가지 방법에 비해 댐의 고유진동수를 산정하는 데 있어 보다 명확한 방법이었다.

표 1은 일본에 위치한 댐들에 대한 고유진동수 산정 사례(Okamoto, 1984)를 나타낸 것인데, 표에서 대상댐과 비슷한 높이 댐들에 대해 산정된 고유진동수값들과 본 연구결과로부터 산정된 값(2.78Hz)을 비교하면 그 결과가 유사함을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 2006년 1월 영월 동쪽 20km 지점에서 발생한 지진에 대하여 현재 운영 중인 댐 부지에서 관측된 미소지진기록을 활용하여 다양한 방법들로부터 댐 고유진동수를 산정하고 그 결과를 비교

분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실제 운영 중인 H댐 부지에서 측정된 미소지진기록을 활용하여 다양한 방법으로 구한 H댐의 고유진동수는 2.78Hz이었고, 이 값은 대상댐과 비슷한 높이의 일본 댐에 대해 산정된 기존 연구결과와 비교하여 유사한 결과이었다.
2. 미소지진기록을 활용하여 댐 정상부 자유진동기록 분석에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법으로 댐의 고유진동수를 산정하는 경우, 대부분의 필댐의 경우 고유진동수는 5Hz 미만이라는 기존 연구결과를 감안한다면 모두 동일한 고유진동수를 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 분석방법의 객관성이나 명확성을 고려한다면 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 산정방법이 가장 명확한 산정방법인 것으로 판단된다.

표 1. 기존댐의 고유진동수 산정 사례(Okamoto, 1984)

No.	이름	댐타입	높이 H(m)	길이 L(m)	L/H	f <sub>1</sub> (Hz)
1	Miboro	Rockfill Dam	131	405	3.1	1.7
2	Kuzuryu	Rockfill Dam	128	355	2.9	1.9
3	Iwaya	Rockfill Dam	128	366	2.9	1.8
4	Shimokotori	Rockfill Dam	119	289	2.4	2.3
5	Yanase	Rockfill Dam	115	202	1.8	2.4
6	Makio	Rockfill Dam	105	264	2.5	2.6
7	Niikappu	Rockfill Dam	103	326	3.2	2.2
8	Kurokawa	Rockfill Dam	98	325	3.3	2.4
9	Kisenyama	Rockfill Dam	75	255	2.7	2.0
10	Kassa	Rockfill Dam	90	487	5.4	1.9
11	Miyama	Rockfill Dam	75	334	4.5	2.5
12	Honzawa	Rockfill Dam	73	234	3.2	2.8
13	Tataragi	Rockfill Dam	65	278	4.3	2.5
14	Ookuragawa	Rockfill Dam	45	152	3.4	<b>3.3</b>
15	Tarumizu	Rockfill Dam	43	257	6.0	<b>3.8</b>
16	Ushino	Rockfill Dam	21	160	7.6	3.5
17	Keban	Rockfill Dam	165	610	3.7	1.6
18	Rama	Rockfill Dam	96	230	2.4	4.3
19	Llvn Brianne	Rockfill Dam	91	290	3.2	2.8
20	Fukada	Earth Dam	56	340	6.1	<b>1.9</b>
21	Ainono	Earth Dam	41	133	3.2	<b>2.3</b>
22	Sannokai	Earth Dam	37	150	4.1	2.6
23	Togo	Earth Dam	31	975	31.5	2.4
24	Isshi	Earth Dam	28	178	6.4	4.4
25	Santa Felica	Earth Dam	83	389	4.7	1.6
26	Bouquet Canyon	Earth Dam	67	363	5.4	2.2
27	Cubuk II	Earth Dam	62	230	3.7	2.3
28	Mavrovo	Earth Dam	56	215	3.8	<b>2.8</b>
29	Rifle Gap	Earth Dam	37	458	12.4	3.1
30	Carbon Canyon	Earth Dam	31	587	18.9	1.6
31	Tadjik	Earth Dam	30	129	4.3	2.0
32	Bera	Earth Dam	27	538	19.9	2.7

## 참고문헌

1. 한국수자원학회(2005) 건설교통부승인 댐설계기준.
2. Mejia, L.H., Seed, H.B., and Lysmer, J.(1982), "Dynamic analysis of earth dams in three dimensions", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.18, No.GT12, pp. 1586-1604.
3. Okamoto, S.(1984), "Introduction to Earthquake Engineering", 2nd Ed., University of Tokyo press, pp.466-477.