한국지반환경공학회 논문집
제12권 제6호 2011년 6월 pp. 53~60

미소지진 계측기록을 활용한 국내 사력댐 고유주기 산정방법

Evaluation for Fundamental Periods of Domestic Rockfill Dams with Micro-earthquake Records

하 익 수†
Ha, Iksoo

ABSTRACT : The purpose of this study is to propose a method that can reliably evaluate the fundamental period of a rockfill dam using the micro-earthquake records, which were obtained at the domestic dam sites. For total 20 micro-earthquake records obtained at 7 domestic rockfill dam sites against 6 earthquake events which recently occurred, the fundamental periods of seven rockfill dams were evaluated by two kinds of methods; one is a method using acceleration amplification ratio and the other is a method using acceleration response spectrum ratio. Applicability of each method to evaluation of fundamental periods of domestic rockfill dams was examined. In the moderate seismicity region like our country, the method using acceleration response spectrum ratio, which could evaluate the fundamental period of the rockfill dam using the ratio between the response spectrum for acceleration observed at the dam crest and that observed at the dam base or abutment, proved to be reliable and was proposed in this study. From the results of analyses, it was found that the proposed method could consistently evaluate the fundamental period of the rockfill dam and the results obtained by the proposed method were very similar to the results by the existing method which was proposed from the analysis for the earthquake records observed at Japanese dam sites.

Keywords : Fundamental Period, Rockfill Dam, Micro-earthquake Record, Response Spectrum

요 지 : 본 연구의 목적은 국내 사력댐에서 계측된 미소지진 기록(댐 정상부 계측 최대가속도 0.001g 이하)을 활용하여, 사력댐의 고유주기를 신뢰성 있게 산정할 수 있는 방법을 제시하는 데 있다. 이를 위하여, 최근 국내에서 발생한 6회의 지진에 대해 7개의 사력댐에서 계측된 총 20개의 미소지진 계측기록에 대하여, 비교적 크기가 큰 지진 계측기록(댐 정상부 계측 최대가속도 0.02g)에 대해 적용되었던 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 산정방법과 미소지진 기록에 직접적 적용사례는 없었던 댐 저부(기초부 또는 양안 어버트)와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비에 의한 산정방법을 이용하여 사력댐의 고유주기를 산정해 보았다. 고유주기 산정 결과로부터, 각각의 산정방법이 미소지진 계측기록을 이용하여 국내 사력댐의 고유주기를 일관성 있게 산정할 수 있는 지 여부를 검토하였다. 본 연구에서는 국내와 같이 중약진 지역에서 미소지진 계측기록을 활용하여 사력댐의 고유주기를 산정하고자 하는 경우에는, 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 방법이 가장 합리적인 방법인 것으로 판단되었다. 이러한 방법은 각각의 지진계측 기록에 대해 일관성 있게 사력댐의 고유주기를 산정함을 확인하였다. 또한, 산정된 결과를 기존의 일본 사력댐들에서 계측된 기록을 활용하여 산정한 일본 사력댐의 고유주기 산정결과와 비교한 결과, 매우 유사한 결과를 보임을 확인하였다.

주요어 : 고유주기, 사력댐, 미소지진 계측기록, 응답스펙트럼

1. 서 론

댐의 고유주기를 산정하는 것은 지진발생 시 댐의 거동을 근사적으로 예측할 수 있는 기초자료를 제공받을 뿐만 아니라 수치해석을 이용하여 지진발생 시 댐의 거동을 평가하고자 할 때, 입력물성 및 해석결과의 적정성을 평가할 수 있는 유용한 기준자료로 활용될 수 있다.

고유주기를 산정하는 방법상의 차이는 있으나 기존의 연구결과에 의하면 높이가 30~130m 범위의 필댐(사력댐, 콘크리트표면차수벽형석괴댐, 흙댐을 통칭)의 고유주기는 0.2초~0.8초 범위의 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Abdel-Ghaffar 등, 1979; Makdisi 등, 1979; Mejia 등, 1982; Okamoto, 1984; Uddin 등, 1995).

사력댐의 고유주기를 산정하는 방법에는 지진 계측자료 분석에 의한 방법, 강제 진동 실험(forced vibration experiments)에 의한 방법, 미진동 측정장치(microtremor measurements)에 의한 방법 등이 있다(Ohmachi 등, 1994). 이러한 방법 중에 현재까지는 지진 계측자료를 분석하여 고유주기를 산정하는 방법이 가장 합리적인 방법으로 여겨지고 있다. 국내의 경우, 최근까지 댐에서의 지진 계측이 체계적으로 이루

† 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 기반시설연구소 책임연구원(E-mail : geodoc@kwater.or.kr)

어지지 않아서, 계측기록을 활용하기가 불가한 실정이었다. 그러나 국내에서도 2008년 말까지 주요 대댐인 다목적댐과 용수전용댐에 지진계측기 설치 및 실시간 자료획득 시스템이 구축 완료되어, 2009년 1월부터 다목적댐과 용수전용댐에서 지진자료를 확보할 수 있는 여건이 조성되었다(하익수 등, 2008).

지진 계측자료를 분석하여 기존 사력댐의 고유주기를 산정하는 방법에는 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비에 의한 방법 등이 있다.

댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법이란 댐 정상부에서 관측된 지진기록 중 주진동(main event) 후 자유진동에 의한 파형부분을 발췌하여 일정감쇠비에 대한 가속도 응답스펙트럼 곡선을 작성하고 작성된 응답스펙트럼 곡선에서 첨두값(peak)을 보이는 주기를 고유주기로 간주하는 방법이다(Mejia 등, 1982)(그림 1 참조).

댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법이란 주파수대역에서 댐 기초부 및 어버트(abutment)에서의 가속도 크기와 댐 정상부에서의 가속도 크기의 비를 스펙트럼비(spectral ratio)로 정의하고, 이러한 가속도 스펙트럼비 곡선의 첨두값(peak)을 나타내는 주기를 고유주기로 간주하는 방법이다(Okamoto, 1984; Ohmachi 등, 1994)(그림 2 참조).

댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 고유주기 산정방법은 먼저 댐 저부(기초부 또는 양안 어버트)와 댐 정상부에서 각각 계측된 가속도 시간이력에 대한 응답스펙트럼을 구하고 다음으로 댐 정상부의 가속도 응답스펙트럼을 댐 저부의 가속도 응답스펙트럼으로 나누어 응답스펙트럼비 곡선을 작성한다. 이 결과를 토대로 작성된 응답스펙트럼비 곡선의 첨두값으로 결정하는 방법이다(Makdisi 등, 1979).

상기의 방법들 중 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법은 주진동 이후 자유진동에 의한 계측가속도 파형이 확연히 구분될 수 있을 만큼 충분히 큰 지진기록을 분석하는 경우에 유용하며 국내 사력댐에서와 같이 미소지진기록을 계측하여 분석하는 경우에는 자유진동기록 발췌 자체가 용이하지 않으며 발췌한다고 할지라도 분석자마다 발췌구간에 대한 자의적인 해석이 있을 수 있어서 결과의 신뢰성을 저하시킬 수 있다(하익수 등, 2008). 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법 또한 댐 정상부에서 계측된 가속도의 최대크기가 0.02g 이상의 지진기록에 대해 적용된 방법이다(Okamoto, 1984). 그리고 이 방법은 그림 2에서 보는 바와 같이 퓨리에 스펙트럼비 곡선의 첨두값이 1초 이상의 장주기 영역에서도 크게 나타나 공학적 판단 없이는 구분하기가 용이하지 않다. 특히 국내와 같이 미소지진 계측기록을 활용하는 경우에는 적절한 자료의 평활화(smoothing) 작업이 없이는 첨두값을 구분하기가 용이하지 않을 것으로 예상할 수 있다. 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 고유주기 산정방법은 미소지진 기록에 직접적으로 적용한 사례가 없다. 이러한 산정방법들의 적용상의 한계로 인해 미소지진 계측기록(계측 최대가속도 0.001g 이하)을 활용하여 국내 사력댐의 고유주기를 신뢰성 있게 산정할 수 있는 방법을 선정·제시할 필요가 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 댐 저부와 댐 정상부에서 계측된 미소지진 기록을 활용하여 국내 사력댐의 고유주기를 일관성 있게 산정할 수 있는 방법을 선정·제시하는 데 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 2009년 1월에서 2010년 5월 사이에 국내에서 발생한 6회의 지진에 대해 7개의 사력댐에서 계측된 총 20개의 댐 미소지진 계측기록을 분석하였다. 댐 저부와

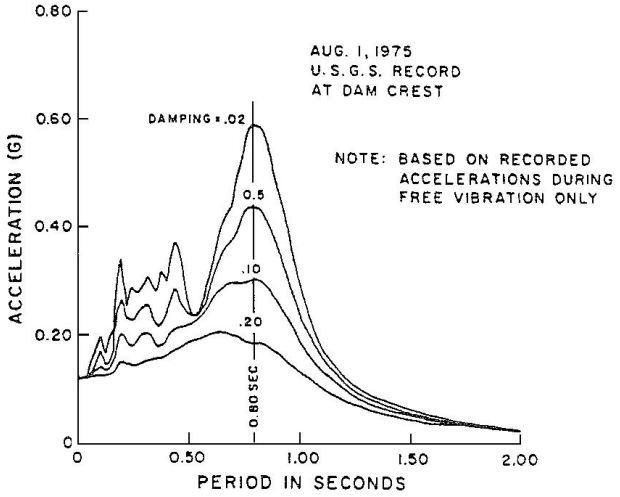


그림 1. 주진동 이후 댐 정상에서 계측된 자유진동 기록에 대한 가속도 응답스펙트럼(Mejia 등, 1982)

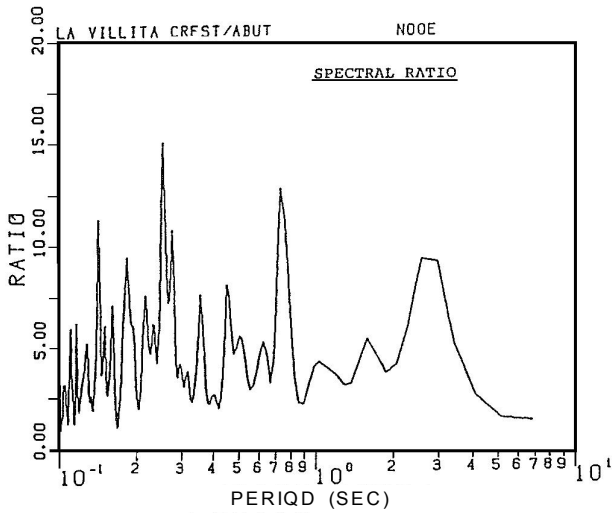


그림 2. La Villita 댐의 퓨리에 스펙트럼비(Ohmachi 등, 1994)

정상부 가속도 증폭비에 의한 방법과 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법으로 사력댐의 고유주기를 산정하고, 그 결과로부터 각각의 방법의 적용성을 검토해 보았다. 또한 선정·제시한 방법으로 산정한 사력댐 고유주기 결과를 일본 댐들에 대해 기존 방법으로 제시한 결과와 비교하여 산정방법의 실효성을 확인해 보았다. 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법은 상기에 제시한 문제점으로 인하여 금번 연구의 해석방법에서는 제외하였다.

2. 미소지진 계측 개요

본 연구에서는 2009년 1월부터 2010년 5월 사이에 한반도 일대에서 발생하여, 본 연구에서 대상으로 하는 댐에 유효하게 계측된 기록을 남긴 지진만을 그 대상 지진으로 하였다. 대상 지진의 규모는 M 2.1~M 3.2 범위였고, 대상 지진에 의해 대상 댐들의 정상부에서 계측된 상하류방향 지진가속도의 최대크기 범위는 0.00005g~0.001g 정도 수준이었다. 표 1은 이러한 계측지진을 요약한 것이다.

표 1에 나타낸 계측지진에 대해 유효한 계측기록을 얻은 사력댐은 표 2와 같이 7개 댐이었다. 표 2는 이러한 지진이 계측된 연구 대상댐의 댐 제원, 미소지진 계측기록, 지진가속도계 설치현황을 나타낸 것이다.

3. 국내 사력댐 고유주기 산정

3.1 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비를 이용한 고유주기 산정

댐 저부와 정상부 가속도 증폭비를 이용한 고유주기 산정방법의 국내와 같은 미소지진 계측기록을 이용하는 경우에 대한 적용성을 확인하기 위하여 전술한 계측지진 기록에

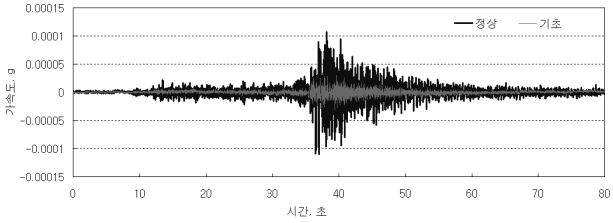


그림 3. D지진시 임하댐 정상부와 어버트에 계측된 가속도 시간이력

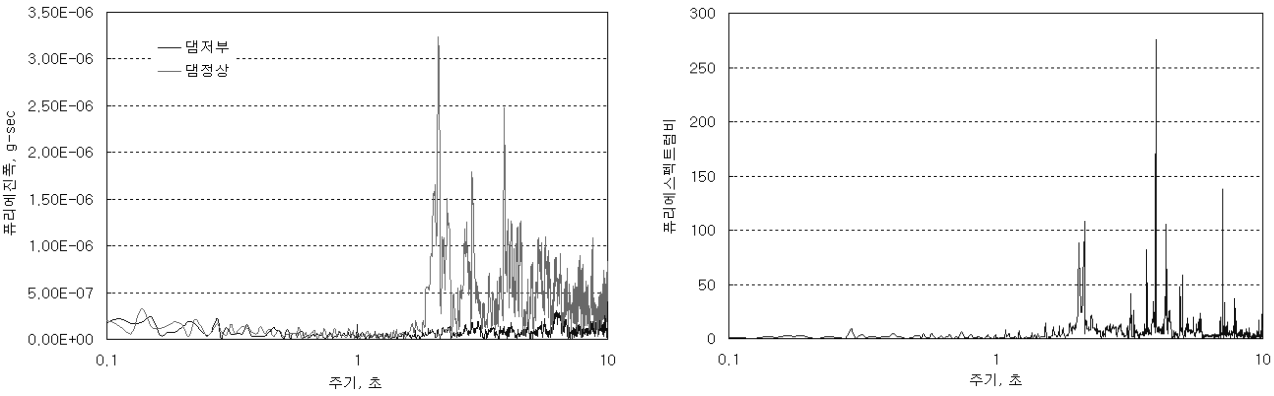
표 1. 계측지진 요약

지진구분	진원시	규모	진앙지	상세 진앙위치	
				위도	경도
A	2010-05-15 14:44	2.2	전북 무주군 동쪽 16km 지역	36.00 N	127.84 E
B	2010-02-21 21:17	2.3	충남 천안시 남서쪽 8km 지역	36.75 N	127.10 E
C	2010-02-16 18:53	3.2	울산 동구 동북동쪽 64km 해역	35.65 N	130.10 E
D	2010-02-09 18:08	3.0	경기 시흥시 북쪽 8km 지역	37.45 N	126.80 E
E	2010-01-23 17:54	2.1	경북 상주시 북쪽 20km 지역	36.59 N	128.17 E
F	2009-01-01 06:45	2.1	경북 구미시 북쪽 22km 지역	36.31 N	128.35 E

표 2. 지진계측 사력댐 제원, 미소지진 계측 기록, 지진계 설치 현황

댐명	댐높이(m)	댐길이(m)	관측 구분 지진 (댐마루 관측최대가속도, g)	지진계 설치 위치(개소)
대암댐	27	318	A*, C (0.00007, 0.001)	댐마루/하류사면선단/좌안암반 (3)
영천댐	42	300	A, D, E, F (0.0001, 0.0001, 0.0001, 0.0004)	댐마루/사면선단/하류좌안암반 (3)
횡성댐	48.5	205	D, E (0.0002, 0.00003)	댐마루/댐사면/우안암반 (3)
운문댐	55	407	A, D, E, F (0.00015, 0.0001, 0.00008, 0.00006)	댐마루/하류선단/우안하류암반 (3)
주암댐	58	330	A, B, D (0.00005, 0.00005, 0.0001)	댐마루/하류중간/좌안암반 (3)
임하댐	73	515	C, D, F (0.00036, 0.0001, 0.0005)	댐마루/하류사면/우안하류암반 (3)
소양강댐	123	530	B, D (0.0001, 0.0004)	댐마루/하류사면/우안하류암반 (3)

* : A~G는 표 1에서 구분 제시한 지진을 의미함



(a) 댐 저부 및 정상부 가속도 퓨리에진폭

(b) 퓨리에 스펙트럼비

그림 4. D지진시 임하댐 미소지진계측기록을 활용한 댐 고유주기 산정 예시(댐저부와 정상부 가속도증폭비 이용)

적용하여 사력댐의 고유주기를 산정해 보았다.

그림 3은 D지진(표 1 참조) 발생으로 인해 임하댐 어버트(abutment)와 댐 정상부에서 계측된 미소지진 가속도 시간이력을 나타낸 것이다.

그림 4는 D지진에 의해 임하댐에서 계측된 미소지진기록을 이용하여 댐의 고유주기를 산정하는 절차를 예로써 나타낸 것이다. 그림 4의 (b)는 그림 4의 (a)에 나타난 댐 정상부의 퓨리에진폭(Fourier amplitude)을 댐저부의 퓨리에진폭으로 나눈 가속도 증폭비를 나타낸 것이다. 그림 4의 (b)에서 기존의 연구결과에 의해 필댐에서 의미있는 주기 범위(약 0.2~0.8초)내의 첨두값을 찾아 고유주기를 산정하여야 하나 그림에서 볼 수 있듯이 이러한 범위내에서 의미있는 첨두값을 찾기는 불가능함을 확인할 수 있다.

그림 5는 이러한 산정방법의 절차로서 각 댐별 퓨리에 스펙트럼비 곡선을 나타낸 것이다. 그림 5의 결과는 그림 2에서 보여지는 것과 유사하게 기존의 필댐 고유주기 산정사례(약 0.2~0.8초)에 비추어 결코 나타날 수 없는 1.0초 이상(고유진동수 1Hz 이하)의 주기에서 첨두값이 두드러지며, 특히나 본 연구에서와 같이 미소지진 기록인 경우에는 주기 1.0초 이하 범위에서의 첨두값은 거의 두드러지지 않거나, 두드러지더라도 상이한 지진에 대해서는 거의 일관성 있는 결과를 주지 않음을 확인할 수 있다. 따라서, Okamoto(1984)가 제시했던 이러한 분석방법은 일정크기 이상의 가속도(댐정상에서 0.02g)를 계측한 경우에는 적용이 가능하나, 국내에서와 같이 지진가속도의 크기가 매우 작은 미소지진기록(댐정상에서 0.001g 이하)에 적용하는 데에는 한계가 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 고유주기 산정

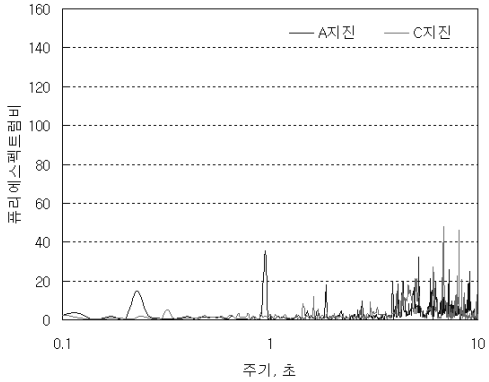
본 절에서는 앞 절에서와 마찬가지로 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 고유주기 산정방법의 국내와 같은 미소지진 계측기록을 이용하는 경우에 대한 적용성을 확인하기 위하여, 전술한 계측지진 기록에 적용하여 사력댐의 고유주기를 산정해 보았다. 다만, 고유주기를 산정함에 있어 기존의 연구결과에 의해 필댐에서 의미있는 주기 범위(약 0.2~0.8초)내에서 응답스펙트럼비 곡선의 첨두값을 이용하였다.

그림 6은 D지진에 의해 임하댐에서 계측된 미소지진기록(그림 3 참조)을 이용하여 댐의 고유주기를 산정하는 절차를 예로써 나타낸 것이다. 그림 6으로부터 임하댐의 D지진 계측기록에 의한 고유주기는 0.5초(고유진동수는 2Hz)로 산정될 수 있다.

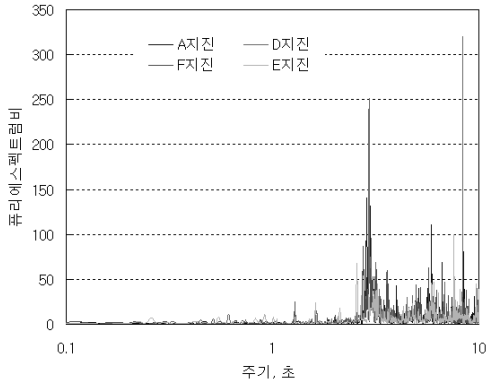
그림 7은 이러한 방법에 따라 고유주기 산정을 위해 작성한 각 지진에 대한 각 사력댐의 응답스펙트럼비 곡선을 나타낸 것이며, 곡선에서 첨두값을 나타내는 주기로부터 고유주기를 산정한 결과를 표 3에 나타내었다. 다만, 그림 7에서 주암댐과 소양강댐의 경우에는 각각 D지진시와 B지진시에 크기가 비슷한 2개의 첨두값을 나타내어 구분이 다소 어려운 점이 있었는데, 본 연구에서는 타 지진시(주암댐의 경우에는 A와 B지진, 소양강댐의 경우에는 D지진)의 응답스펙트럼비 곡선의 첨두값 위치를 참고하여 첨두값을 나타내는 주기를 결정하였다.

그림 7과 표 3의 결과를 통해 본 연구에서 제시한 방법을 적용하면 고유주기 산정을 위한 스펙트럼비 곡선의 첨두값(peak)을 구분하기 용이하며, 주암댐과 소양강댐에서 일부 지진시 첨두값 구분이 다소 어려운 점을 제외하고는 고유주기 역시 각기 다른 지진에 대해서 산정된다고 할지라도 거의 일관성있는 결과를 도출함을 확인할 수 있다.

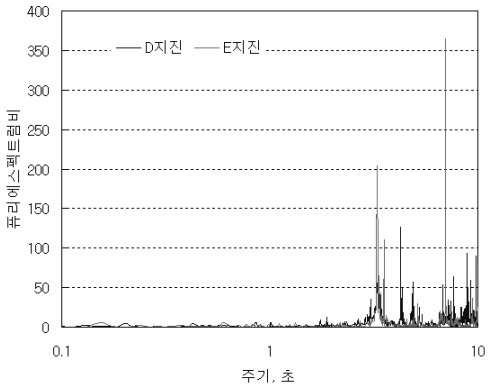
응답스펙트럼 곡선은 가속도 응답스펙트럼이 단자유도계에서 발생하는 각 주기에서의 최대 응답가속도만을 산출하기 때문에 자연스럽게 평활화(smoothing) 된다. 이로 인하여,



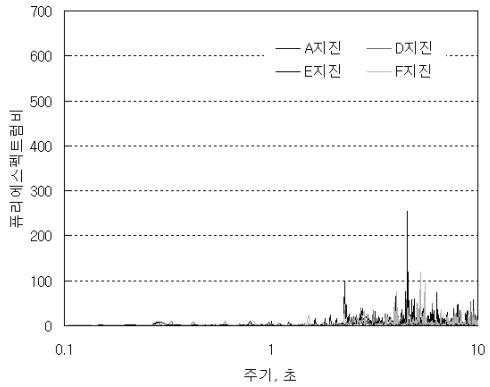
(a) 대암댐



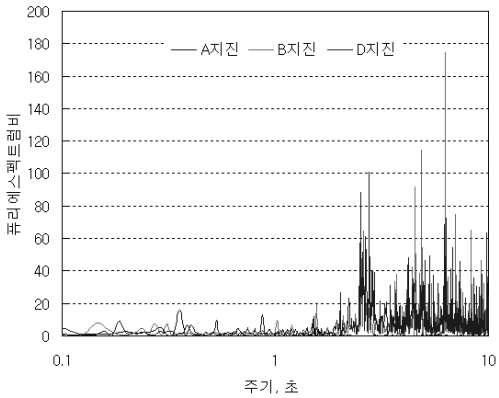
(b) 영천댐



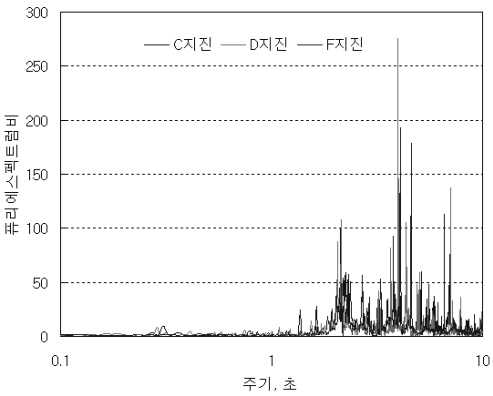
(c) 횡성댐



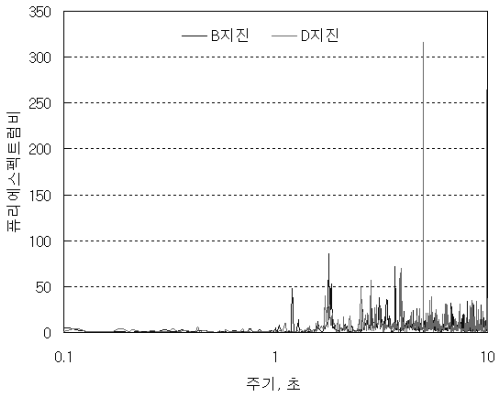
(d) 운문댐



(e) 주암댐

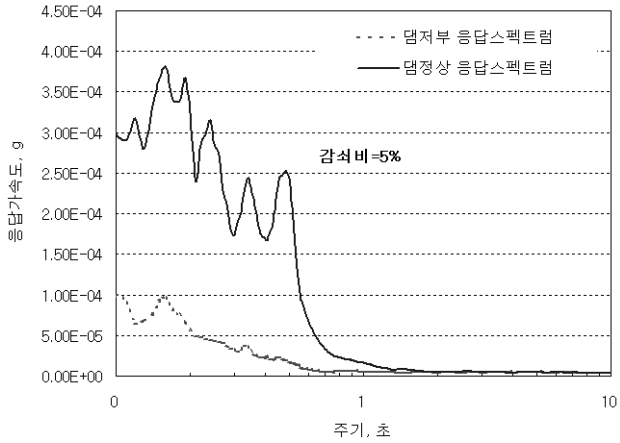


(f) 임하댐

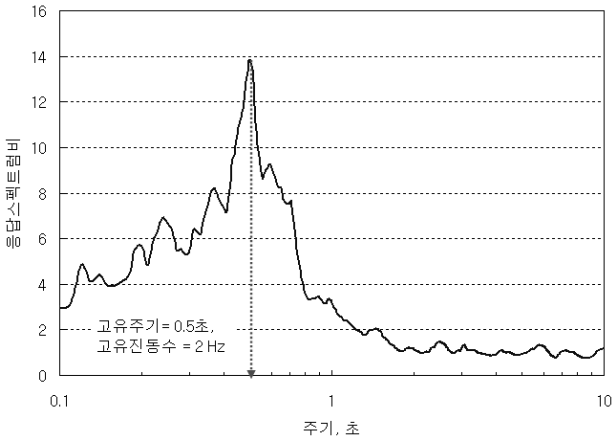


(g) 소양강댐

그림 5. 댐 저부와 정상부 계측가속도의 퓨리에 스펙트럼비



(a) 댐 저부 및 정상부 응답스펙트럼



(b) 응답스펙트럼비에 의한 고유주기 산정

그림 6. D지진시 임하댐 미소지진계측기록을 활용한 댐 고유주기 산정 예시(댐 저부와 정상부 응답스펙트럼비 이용)

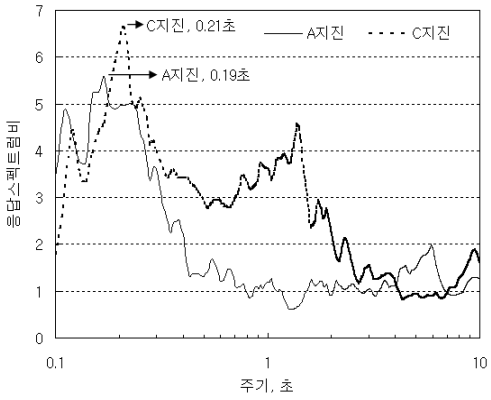
표 3. 국내 7개 사력댐 고유주기 산정 결과

번호	댐명	댐높이(m)	댐길이(m)	지진구분	고유주기(초)
1	대암댐	27.0	318	A*	0.19
2				C	0.21
3	영천댐	42.0	300	A	0.34
4				D	0.33
5				E	0.34
6				F	0.32
7	횡성댐	48.5	205	D	0.31
8				E	0.30
9	운문댐	55.0	407	A	0.40
10				D	0.39
11				E	0.36
12				F	0.39
13	주암댐	58.0	330	A	0.42
14				B	0.39
15				D	0.38
16	임하댐	73.0	515	C	0.46
17				D	0.50
18				F	0.48
19	소양강댐	123.0	530	B	0.55
20				D	0.58

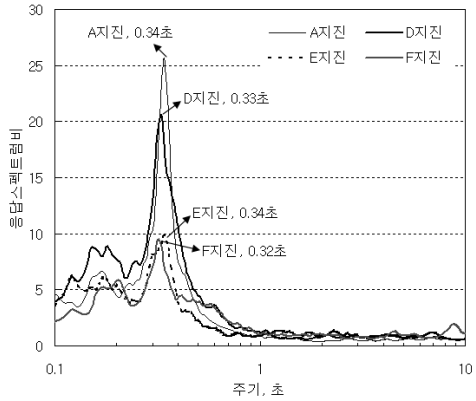
* : A～G는 표 1에서 구분 제시한 지진을 의미함

가속도 응답스펙트럼비 곡선은 퓨리에 변환 결과와는 상이하게 스파이크(spike)가 자연스럽게 제거되고, noise에 대한 응답이 최소화되어 요동이 없는 곡선의 형태를 가지게 되어, 고유주기 산정을 위한 첨두값의 구분을 용이하게 한다.

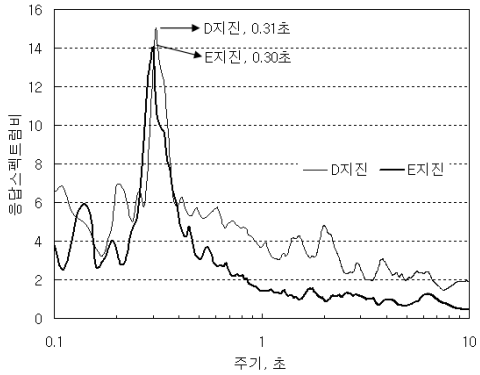
그림 8은 이러한 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비에 의한 산정방법의 실효성을 확인하기 위하여, 1984년 Okamoto가 일본 내 16개 사력댐에서 댐마루에서의 계측가속도 수준이 0.02g 이상인 20개의 지진계측자료를 댐 저부와 정상부의 가속도 증폭비로 산정한 고유주기값을 댐 높이에 대해 나타낸 것이며(1984), 여기에 상기의 방법으로 국내 사력댐에 대해서 구한 고유주기값을 함께 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비에 의한 산정방법으로 산정한 결과는 Okamoto가 제시한 결과와 비교하여 고유주기값 자체나 고유주기의 댐 높이에 따른 경향이 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 국내 사력댐에 대한 고유주기 산정 결과가 일본 사력댐에 대한 고유주기 산정 결과에 비하여 댐 높이에 대한 분산도가 오히려 작음을 확인할 수 있다.



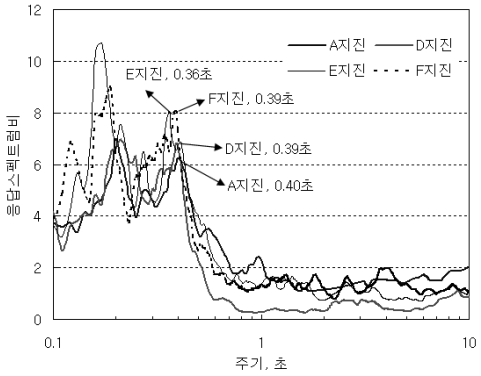
(a) 대암댐



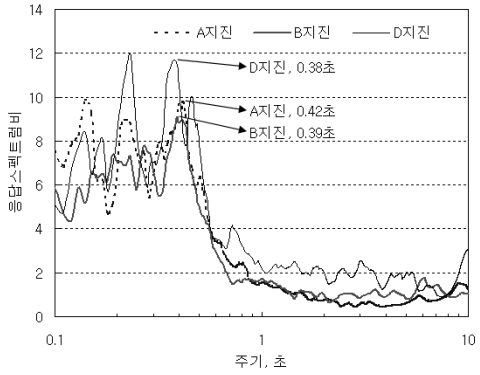
(b) 영천댐



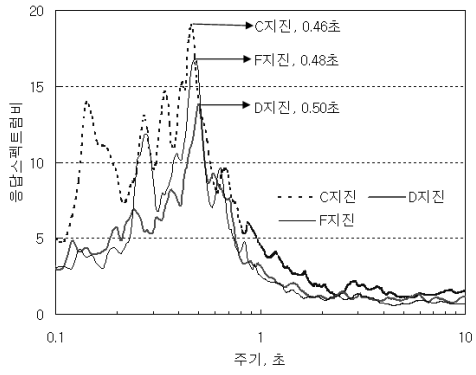
(c) 횡성댐



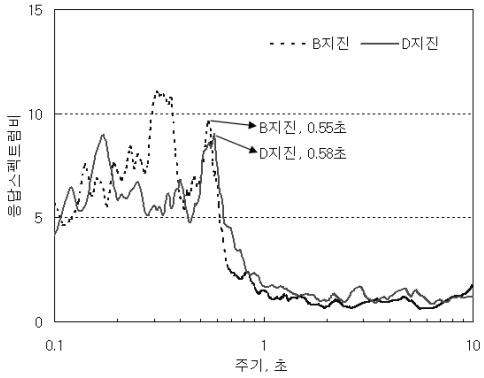
(d) 운문댐



(e) 주암댐



(f) 임하댐



(g) 소양강댐

그림 7. 댐 저부와 댐 정상부 계측 가속도의 응답스펙트럼비

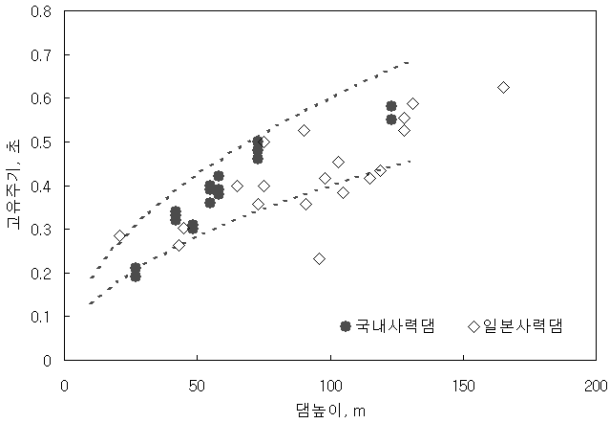


그림 8. 일본 사력댐과 국내 사력댐 고유주기 산정결과 비교

결론적으로, 본 연구에서는 국내와 같이 미소지진 계측기록을 활용하여 사력댐의 고유주기를 산정하고자 하는 경우에는 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 방법이 가장 합리적인 방법인 것으로 판단되었다.

4. 결　론

본 연구에서는 국내 사력댐에서 계측된 미소지진 기록(댐정상부 계측 최대가속도 0.001g 이하)을 활용하여 사력댐의 고유주기를 일관성 있게 산정할 수 있는 방법을 선정·제시하였다. 제시된 방법은 댐 정상부에서 계측된 가속도 시간이력의 일정감쇠비(본 연구에서는 5% 적용)에 대한 응답스펙트럼과 댐 저부(기초부 또는 양안 어버트)에서 계측된 가속도 시간이력의 일정감쇠비에 대한 응답스펙트럼의 비(ratio)를 나타내는 곡선에서, 첨두값을 보이는 주기를 사력댐의 고유주기로 간주하는 방법이다.

제시된 방법으로 2009년 1월부터 2010년 5월 사이에 국내에서 발생한 6회의 지진에 대해 7개의 사력댐에서 계측된 총 20개의 미소지진 계측기록을 분석하여 사력댐의 고유주기를 산정해 본 결과 고유주기를 일관성 있게 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 산정된 결과는 기존의 일본 댐에서 계측된 결과로 제시된 기존 연구결과와 비교하여 그 실효성이 입증되었다. 아울러 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 산정방법은 미소지진기록이 아닌 일정 크기(댐정상부 계측 최대가속도 0.02g) 이상의 계측기록을 활용하는 경우에 적용될 수 있는 방법인 것으로 판단되었고, 본 연구에서 대상으로 하는 미소지진기록을 이용하는 경우에는 그 적용에 한계가 있음을 확인하였다.

본 연구로부터 산정된 각 사력댐에서의 고유주기는 지진발생 시 댐의 거동을 근사적으로 예측할 수 있는 기초자료를 제공할 뿐만 아니라, 수치해석을 이용하여 지진발생 시 사력댐의 거동을 평가하고자 할 때, 입력물성 및 해석결과의 적정성을 평가할 수 있는 유용한 기준자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 본 연구대상 사력댐 외에 더 많은 수의 사력댐에 대해서도 지속적인 지진계측 기록을 확보하고 분석하여 제시된 방법의 추가 검증이 필요할 것으로 여겨지며 상대적으로 더 큰 지진기록이 계측되는 경우, 계측지진 가속도의 크기에 따른 사력댐의 고유주기 변화에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F045)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 하익수, 이종욱, 조성은, 오병현(2008), 지진대비 댐안전관리를 위한 지진감시시스템 구축 및 계측기록 활용, *2008년 가을학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp. 1389～1396.
2. Abdel-Ghaffar, A. M. and Scott, R. F.(1979), Analysis of Earth Dam Response to Earthquakes, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. GT 12, pp. 1379～1404.
3. Makdisi, F. I. and Seed, H. B.(1979), Simplified Procedure for Evaluating Embankment Response, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. GT 12, pp. 1427～1434.
4. Mejia, H., Seed, H. B. and Lysmer, J.(1982), Dynamic Analysis of Earth Dams in Three Dimensions, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 108, No. GT 12, pp. 1586～1604.
5. Ohmachi, T. and Kuwano, J.(1994), *Dynamic Safety of Earth and Rockfill Dams*, A.A. BALKEMA/ROTTERDAM, pp. 32～49.
6. Okamoto, S.(1984), *Introduction to Earthquake Engineering*, 2nd Edition, University of Tokyo Press, pp. 466～477.
7. Uddin, N. and Gazetas, G.(1995), Dynamic Response of Concrete-faced Rockfill Dams to Strong Seismic Excitation, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 121, No. 2, pp. 185～197.

(접수일: 2011. 4. 1 심사일: 2011. 4. 6 심사완료일: 2011. 4. 27)