발파진동실험을 이용한 사력댐의 고유주기 산정

Evaluation of Fundamental Period of Rockfill Dam Using Blasting Vibration Test

김남룡* · 하익수**

Kim, Nam-Ryong · Ha, Ik-Soo

Abstract

The objective of this study is to present and verify a method for evaluating the fundamental period of a rockfill dam using artificially generated vibration from a blasting event. In this study, the artificial blasting vibration tests were carried out at the site adjacent to the existing Seongdeok Dam for the first time in Korea. The artificial vibrations were induced by 4 different types of blasting with the various depths of blasting boreholes and the various explosive charge weight. During the tests, the accelerations time histories were recorded at the crest of the dam. In this acceleration history, only free vibration decay part following the main vibration event was extracted and it was analyzed by frequency domain analysis using Fast Fourier Transform (FFT). From the results of FFT, the fundamental period of the target dam was evaluated. It is found that the effect of different blasting types on the fundamental period of the target dam is negligible and the fundamental period of the target dam can be consistently obtained by blasting vibration tests. Furthermore, it is found that the period of the target dam calculated by the method using blasting vibration test is similar to that obtained by the method of previous researchers using the real earthquake records. Therefore, in case that the earthquake record is not available, the fundamental period of a rockfill dam can be reasonably evaluated if blasting vibration test is allowed at the site adjacent to the dam.

Keywords : rockfill dam, fundamental period, blasting vibration, instrumental earthquake record, free vibration

요 지

본 연구의 목적은 댐 인접발파로 유발된 진동을 이용하여 사력댐의 고유주기를 산정하는 방법을 제시하고, 산정결과와 실험효성을 확인하는 것이다. 이를 위하여 운영 중인 성덕댐에 대하여 국내 최초로 실험규모 근접 발파진동 실험을 수행하였다. 장약량과 발파 시추공심도를 4가지 유형으로 달리한 발파진동을 유발시키고, 각 유형별 발파 시에 댐 정상부에서 가속도를 계측하였다. 계측기록 중 발파로 인한 주 진동 이후 자유진동감쇠에 의한 계측기록만을 발췌하였으며, 이에 대한 주파수응답 특성을 분석하여 대상댐의 고유주기를 산정하였다. 발파진동실험으로 구한 사력댐의 고유주기는 발파유형에 영향을 받지 않고 일관성 있는 결과를 보여줌을 확인하였다. 발파진동실험에 의한 대상댐의 고유주기 산정결과를 실지진 계측기록을 분석하는 방법으로 구한 기존의 연구결과와 비교해 본 결과, 그 경향성이 일치함을 확인하였다. 이로부터 지진계가 설치되지 않아 실지진 계측기록을 이용할 수 없는 사력댐의 경우, 인접발파에 따른 발파진동계측기록에 대한 분석으로도 고유주기를 실험성 있게 산정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 사력댐, 고유주기, 발파진동, 실지진 계측기록, 자유진동

1. 서 론

댐의 고유주기를 산정하는 것은 지진발생시 댐의 거동을 근사적으로 예측할 수 있는 기초자료를 제공할 뿐만 아니라, 수치해석 방법으로 댐의 지진 시 동적거동을 평가하고자 할 때 입력물성 및 해석결과의 적정성을 평가할 수 있는 기준 자료로 유용하게 활용될 수 있다. 사력댐의 지진거동에 대한 연구는 일반적으로 댐에서 지진에 의하여 발생한 진동계측 자료를 분석하는 방법, 실제 댐에 대한 현장시험을 이용하여 동적물성을 평가하는 방법, 진동대시험이나 원심모형시험과

같은 축소 모형시험, 해석적인 방법 등에 의하여 이루어진다 (Jafari and Davoodi, 2006). 이들 방법 중 사력댐의 고유주기를 산정하고자 하는 경우, 지진 시 댐에서 계측된 자료를 분석하는 방법이 많이 적용되고 있다.

국내의 경우, 댐 지진계측기의 설치현황은 현재까지 다목적댐과 용수전용댐에 국한되어 있으며, 중소규모댐에는 상시 지진을 관측할 수 있는 지진계측기가 설치되어 있지 않다. 이러한 이유로 지진계측기가 설치되어 있지 않은 사력댐의 경우, 지진계측기록을 활용한 고유주기 산정은 사실상 불가능한 실정이다.

*정회원 · K-water 연구원 선임연구원 (E-mail : namryong@kwater.or.kr)

**정회원 · 교신저자 · 경남대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : geotech@kyungnam.ac.kr)

본 연구에서는 이러한 지진계측기가 설치되어 있지 않은 사력댐의 고유주기를 실효성 있게 산정할 수 있는 대안으로, 인접발파에 따른 발파진동계측기록을 적극 활용하는 방법을 모색하였다. 본 연구의 목적은 발파진동실험으로부터 사력댐의 고유주기를 산정하는 방법을 제시하고, 산정결과의 실효성을 확인하는 것으로, 이를 위하여 국내 최초로 실제 운영 중인 사력댐에 대한 실험규모 근접 발파진동실험(blasting vibration test)을 수행하였다.

발파진동실험으로 계측된 댐 정상부의 가속도 기록 중, 주진동 이후 자유진동감쇠 가속도 시간이력만을 대상으로 주파수분석을 수행함으로써, 대상 사력댐의 고유주기를 산정하였다. 발파진동의 다양한 특성에 따른 고유주기 산정 결과의 일관성을 확인하기 위하여, 발파심도와 장약량을 변화시킨 4가지 발파유형의 인공 발파진동실험 및 해당 데이터 분석을 수행하였다. 이와 같은 댐의 고유주기 산정 결과는 상호 비교를 통하여 일관성을 확인하였고, 산정된 결과는 기존의 연구결과로부터 산정된 사력댐의 고유주기 값들과 비교하여, 그 실효성을 확인하였다.

2. 기존 연구결과 고찰 - 진동 계측기록을 활용한 사력댐 고유주기 산정

Mejia 등(1982)은 댐 정상부에서 관측된 지진가속도기록

그림 1. 주 진동 이후 댐 정상에서 계측된 자유진동 기록에 대한 가속도 응답스펙트럼(Mejia et al., 1982)

(a) 댐 저부 및 정상부 응답스펙트럼

중 주 진동(main event) 후 자유진동에 의한 파형부분을 발췌하여 일정감쇠비에 대한 가속도 응답스펙트럼 곡선을 작성하고, 작성된 응답스펙트럼 곡선에서 첨두값(peak)을 보이는 주기를 고유주기로 간주하는, 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법을 이용하여 사력댐의 고유주기를 산정하였다(그림 1).

Okamoto(1984)와 Ohmachi and Kuwano(1994)는 주파수 대역에서 댐 기초부 또는 어버트(abutment)에서의 가속도 크기와 댐 정상부에서의 가속도 크기의 비를 스펙트럼비(spectral ratio)로 정의하고, 이러한 가속도 스펙트럼비 곡선의 첨두값을 나타내는 주기를 고유주기로 간주하는, 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법으로 사력댐의 고유주기를 산정하였다(Okamoto, 1984; Ohmachi and Kuwano, 1994)(그림 2).

하익수(2011)는 댐 정상부에서 계측된 가속도 시간이력의 일정감쇠비(5%)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 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 사력댐의 고유주기 산정방법을 제안하였다(그림 3). 이러한 방법을 이용하여 최근 국내에서 발생한 6회의 지진에 대해 총 20개의 미소지진 계측기록을 분석함으로써 7개의 국내 주요 사력댐의

그림 2. La villita 댐의 푸리에스펙트럼비(Ohmachi and Kuwano, 1994)

(b) 응답스펙트럼비에 의한 고유주기 산정

그림 3. 임하댐 미소지진계측기록을 활용한 댐 고유주기 산정 예시(하익수, 2011)

그림 4. 대상댐(성덕댐)의 표준단면도

고유주기를 산정한 바 있다.

국내의 경우, 댐 지진계측기의 설치현황은 현재까지 다목적댐과 용수전용댐에 국한되어 있으며, 중소규모댐에는 상시 지진을 관측할 수 있는 지진계측기가 설치되어 있지 않다. 지진계측기록을 확보할 수 없는 경우, 주변 환경 진동계측기록을 활용한 방법(ambient vibration monitoring)이 그 대안으로 적용될 수도 있다. 환경진동 계측기록을 활용한 방법이란, 바람, 기계진동, 댐 방류에 의한 진동 등과 같은 상시 미진동을 활용하는 방법이다. 그러나 최근에 신호처리기술(signal processing techniques)이 고도화되었다고 하더라도 이러한 방법은 지진에 의한 지진동에 비해 상대적으로 매우 작은 진폭의 미진동이 계측되는 한계가 있으므로, 이러한 수준의 진동 분석은 선행탄성 범위 내에서 댐의 동적거동을 보정하는 데 이용하는 것이 보다 적절한 것으로 평가되고 있다(Jafari and Davoodi, 2006).

보다 큰 진폭의 진동을 인위적으로 유발하여 계측기록을 얻어 분석하는 방법으로는 발파진동(blasting vibration)에 의한 방법이 있다(정석영 등, 2002; 이연수와 장서일, 2005). Jafari and Davoodi(2006)는 이란 서부에 위치한 높이 177m의 사력댐인 Masjed Soleiman 댐을 대상으로 환경진동(ambient vibration)(Davoodi, 2003)과 발파진동 계측실험을 실시하여 댐체의 응답을 관찰하였다. 발파진동원은 댐 우안에서 300m 이격된 지점과 댐체로부터 약 2km 떨어진 채석장에서 발파에 의한 진동으로 선정하였다. 해당 발파진동실험은 댐체와의 이격거리가 멀어 측정 가속도의 진폭이 미소하였고, 측정에 사용된 계측기들의 분해능(resolution) 부족으로 인하여 환경진동 실험결과를 보충해주는 정도의 결과만을 얻는 수준에 머무르는 한계를 나타내었다(Jafari and Davoodi, 2006).

3. 댐 발파진동실험

3.1 실험 대상댐 개요

발파진동실험 대상댐은 성덕댐으로, 경상북도 청송군에 위치한다. 대상댐은 제체의 최대높이가 19m인 중심코어형 사력댐으로 횡단면의 상단은 5m, 하부는 40m의 폭으로 축조되었으며 콘크리트 구조물로 조성된 월류부가 있다. 대상댐은 일부구간에 대하여 하류에 신설되는 성덕다목적댐 준공 후 철거 예정(2012년 말)에 있다. 본 연구에서는 이러한 이유로 성덕댐을 실험규모 발파진동실험을 위한 대상댐으로 선정하였다. 그림 4는 대상댐의 표준단면도를 나타낸 것이다.

그림 5. 발파 시추공 위치 및 가속도계 설치 위치

그림 6. 발파 시추공 천공 및 시추위치 지반 주상도

표 1. 발파시추공 위치 지반 지층개요

구 분	층 후 (m)	출현심도 (GL.-m)	구 성 상 태	TCR/RQD(%)
붕적층	0.2	0.0	· 자갈섞인 실트질 세립 내지 조립모래로 구성 · 암갈색, 습윤, 느슨한 조밀도를 보임	-
연암	24.8	0.2	· 보통 내지 약간풍화, 보통 내지 약간균열 · 보통강함 내지 강한강도의 응회암	100/87~93

표 2. 발파유형 요약

회 차	구 분	공 수	공당천공심도(m)	총장약량(kg)
1	Hole #1(Type-I)	1	6	5
2	Hole #2(Type-II)	1	12	10
3	Hole #3(Type-III)	1	18	15
4	Hole #4(Type-IV)	1	25	19

3.2 발파시추공 및 발파유형 정보

그림 5는 발파진동실험을 위해 천공된 발파시추공의 수평 위치를 나타낸다. 대상댐의 댐축과 발파시추공 사이의 거리는 약 60m 이격되어 있다. 발파실험을 위한 시추공이 위치한 지반의 시추주상도와 지층개요를 각각 그림 6과 표 1에 나타내었다. 그림 6과 표 1을 통해서 시추공 위치는 암반상태가 양호한 경암 지반임을 확인할 수 있다.

발파진동의 다양한 특성에 따른 고유주기 산정 결과의 일관성을 확인하기 위하여, 발파심도와 설치되는 장약량을 다

르게 한 4가지 발파유형의 인공 발파진동실험을 수행하였다. 발파진동의 진폭, 방향성 등을 변화시켜 다른 진동유형에 대한 댐 정상부에서의 가속도 계측기록을 얻고자 하였다. 표 2는 발파유형별 각 시추공의 각기 다른 발파심도와 장약량을 나타내며, 상세한 발파유형은 그림 7을 통하여 확인할 수 있다.

현재 운영 중인 대상댐의 손상을 방지하기 위하여 허용진동수준은 5cm/sec로 설정하였으며, 사전 발파진동 영향평가를 수행함으로써 천공심도와 각 공에서의 최대장약량이 허용진동수준 이하가 되도록 결정하였다.

3.3 실험 절차 및 방법

진동실험을 위한 본발파 수행 이전에, 발파에 따른 운영 중인 댐(성덕댐)의 손상여부를 조사하기 위한 발파영향평가를 수행하였다. 발파영향평가는 사용 예정인 최대 지발당장약량(19kg)에 대한 허용진동수준을 이격거리에 따른 발파진동추정식으로부터 추정하여, 발파진동실험 시 댐 제체에서 측정되는 진동속도가 5cm/sec로 설정된 허용진동수준을 넘지 않음을 미리 확인하였다.

폭약을 설치(장약)하기 위하여, 시험위치에 매 시추공별 약 5m의 이격거리를 유지한 채 총 4개의 시추공을 천공하였다. 천공된 시추공의 댐체와의 수평 상대위치는 그림 5에, 시추공이 위치한 지반의 주상도는 그림 6에 나타내었다.

그림 8은 본 연구에서 수행한 발파진동실험에 대한 일련의 절차를 나타낸 것이다. 발파를 위한 기폭시스템은 지하수위를 고려하여 결선 부위의 방수를 고려한 시스템으로 제작하였으며, 발파실험 전에 천공공의 상태를 점검·확인하였다.

그림 7. 발파진동실험 상세 발파 유형(type)

그림 8. 발파진동실험 진행 절차

장약을 위한 폭약은 각 천공위치별로 필요 수량을 사전에 배치하였다. 장약작업 후, 폭약의 폭발력을 집중시키고 폭발력에 의한 비산을 방지하기 위하여, 세석골재를 이용한 전색작업을 수행하였다. 발파진동의 계측은 댐 정상부에 가속도계를 설치하여 수행하였으며, 가속도계의 설치위치는 그림 5에 나타나 있다.

4. 발파진동실험 결과 및 분석

4.1 고유주기 산정

각 유형별 발파진동실험으로부터 댐 정상부에서 계측된 가속도 시간이력 기록은 그림 9와 같다. 그림 9에서 계측된 가속도의 초동감지 시각은 실제 지반을 통한 도달시간 시점을 의미하는 것은 아니다. 그림 9에 나타난 바와 같이 발파 유형별로 댐 정상부에 설치된 가속도계로부터 계측된 가속도 시간이력의 최대 진폭은 0.058g~0.080g의 범위로 계측되었으며, 발파유형별로 다양한 값을 나타냄을 알 수 있다.

그림 10은 발파유형별 실험동안 댐 정상부에 설치된 가속도계로 계측한, 가속도 시간이력에 대한 주파수응답특성의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 전반적인 퓨리에진폭 곡선의 형태는 유사하나, 각각의 유형별로 지배주파수나 주파수 특성은 다르게 나타남을 알 수 있다. 퓨리에진폭 곡선의 형태가 상호간에 유사한 것은, 발파공이 위치한 지반의 층후가 지표부터 시추공 바닥까지 거의 일정하게 경암이 분포되어 있고, 암반의 상태 또한 매우 양호한 상태이므로, 심도 및 장약량에 의한 발파유형 변화가 정상부에서의 가속도의 진폭크기에만 영향을 크게 미쳤기 때문

인 것으로 판단된다.

본 연구에서 발파 위치는 댐 정상부에 전달되는 가속도의 진폭을 크게 하여 댐의 응답 산정을 용이하게 하기 위하여 댐체로부터 불과 60m 이격된 근거리 지점으로 선정하여 실험을 수행하였다. 그러나 근거리 발파로부터 소정 진폭의 가속도 기록을 얻을 수 있다 하더라도, 계측된 전체 기록은 지진동의 주파수 특성과는 상이한 고주파수대역을 다수 포함하는 발파진동의 주파수특성을 보이므로, 전체 기록을 분석할 경우 지진동에 의한 댐체의 특성을 명확히 구분하여 파악하기는 어렵다. 단, 인위적으로 유발시킨 발파진동은 진동원으로서 댐체에 충분히 큰 진폭의 에너지를 제공하므로, 발파진동 자체특성을 배제할 경우 댐의 고유응답특성에 의한 신호만을 선별적으로 분석할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 댐에서 계측된 전체 기록 중 주 진동, 즉 발파진동 특성에 의한 신호 이후에 계측되는 자유진동 감쇠부분의 기록만을 분석하는 방법을 적용함으로써 댐의 진동특성과 상이한 발파진동의 주파수특성영향을 줄이고자 하였다. 즉, 발파진동실험으로 계측된 댐 정상부의 가속도 기록 중, 발파진동 자체특성이 지배적으로 나타나는 초기 주 진동 이후 댐의 동적응답특성이 지배적으로 나타나는 후반부 자유진동감쇠 가속도 시간이력만을 대상으로 주파수분석을 수행함으로써, 대상 사력댐의 고유주기를 산정하였다.

자유진동감쇠 가속도 시간이력 구간에 대한 주파수 분석을 이용한 고유주기 산정방법은 응답가속도의 진폭이 작은 미소지진기록을 이용하여 적용하는 경우에는 자유진동 감쇠 구간을 객관적이고 정량적인 기준으로 발췌하는 것이 어렵기 때문에 구간의 선택이 자의적일 수 있다. 그러므로 이러

그림 9. 각 발파유형별 정상부 가속도 계측 시간이력

그림 10. 각 발파유형별 정상부 가속도 계측 시간이력의 주파수 특성

그림 11. 각 발파유형별 정상부 가속도 계측기록 중 자유진동감쇠 부분 시간이력 곡선

한 자유진동 감쇠곡선을 이용하는 방법은 계측되는 지진 가속도의 진폭이 충분히 커서 주진동과 자유진동부분을 잡음을 감안하더라도 확연히 구분할 수 있는 경우에 적용이 가능하다.

본 연구의 경우는 문헌고찰에서 기술한 Mejia et al.(1982)의 연구사례(최대가속도 0.1g)와 마찬가지로 정상부에서 계측된 최대가속도의 크기가 0.058g~0.08g로 미소지진 가속도 계측 규모의 진폭크기(0.001g이하)(하익수, 2011)보다 훨씬 크며, 그림 9와 그림 11에서처럼 이러한 자유진동의 감쇠구간을 확연히 구분할 수 있으므로 앞서 기술된 방법의 적용이 가능하다. 실제로 본 연구에서 주진동과 자유진동구간의 경계가 불분명한 경우, 보수적 견지에서 후반 구간의 감쇠구간을 선택하더라도 불분명한 경계이후 구간을 발체하는 경우와 비교할 때 고유주기 산정 결과의 일관성은 충분히 유지되는 것으로 나타났다.

그림 11은 댐 정상부에서 계측된 발파유형별 가속도 계측기록 중 자유진동 감쇠를 나타내는 후반부 가속도 시간이력만을 발체하여 나타낸 것이다. 발체된 가속도기록의 자유진동 감쇠 부분에 대한 푸리에변환으로부터 유형별 고유진동

수(f)를 각각 구하고, 이로부터 각 발파유형별 대상댐의 고유주기, $T(=1/f)$ 를 산정하였다.

그림 12는 푸리에변환으로부터 대상댐의 고유진동수를 산정한 결과를 나타낸 것인데, 발파 유형별(Type-I, Type-II, Type-III, Type-IV)로 각각 고유진동수(f)는 6.67Hz, 7.00Hz, 6.74Hz, 6.64Hz인 것으로 나타났다. 산정된 고유진동수로부터 대상댐의 고유주기(T)는 발파 유형별로 각각 0.15초(Type-I), 0.14초(Type-II), 0.15초(Type-III), 0.15초(Type-IV)로 산정되었다. 즉, 각 계측기록에 대하여 자유진동감쇠부분을 발체하여 고유주기를 산정하는 방법으로 구한 대상댐의 고유주기는 발파유형에 크게 영향을 받지 않으며, 약 0.15초의 일정한 주기로 산정될 수 있었다.

이상의 결과로부터, 댐 인접 발파진동계측기록을 활용하여 대상댐의 고유주기를 산정하는 경우, 발파심도와 장약량이 다른 발파유형에 대해서도 댐 고유주기는 일관된 값으로 산출될 수 있음을 확인할 수 있었다.

4.2 산정 결과의 실효성 확인

그림 13은 본 연구에서 산정한 연구 대상댐(성덕댐, 댐 높

그림 12. 발파유형에 따른 계측기록을 활용 산정된 대상댐 고유진동수

그림 13. 국내외 사력댐 고유주기 산정결과와 대상댐 결과 비교

이 19m, 고유주기 0.15초)의 고유주기를 기존의 실지진 계측기록을 분석하는 방법에 의한 댐 고유주기 산정 결과 (Okamoto, 1984; 하익수, 2011)와 비교하여 함께 도시한 것이다. 그림 13에 나타난 일본사력댐에 대한 결과는 1984년 Okamoto가 일본 내 16개 사력댐에 대하여 댐마루에서의 계측가속도 수준이 0.02g 이상인 20개의 지진계측자료를 분석하여, 댐 저부와 정상부의 가속도 증폭비에 의한 방법으로 댐 고유주기를 산정함으로써 그 결과를 댐 높이에 대해 나타낸 것이다. 또한, 국내사력댐에 대한 결과는 전술한 바와 같이 국내에서 최근(2009년 1월부터 2010년 5월 사이)에 발생한 6회의 지진에 대해 7개의 사력댐에서 계측된 총 20개의 미소지진 계측기록을 이용하여, 댐 저부와 정상부의 가속도 응답스펙트럼비 산정에 의한 방법으로 구한 댐 고유주기를 댐 높이에 대하여 나타낸 것이다(하익수, 2011). 본 연구에서의 대상댐은 지진계가 설치되지 않은 중소규모 댐이므로, 기존 연구결과 대상댐들과는 높이면에서 다소 차이를 보인다. 그러나 그림 13에서 기존의 실계측지진기록을 활용하여 산정한 결과들과 비교할 때, 일관된 경향성이 나타남을 확인할 수 있으며, 따라서 본 연구의 해석결과에 대한 실효성은 확인된 것으로 판단되었다.

이상의 결과로부터 지진계가 설치되지 않아 실지진 계측기록을 이용할 수 없는 경우, 인접발파에 따른 발파진동계측기록에 대한 분석으로도 사력댐의 고유주기를 실효성 있게 산정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 최초로 운영 중인 실제 사력댐(성덕댐)에 대해서 실험규모 근접 발파진동 실험을 수행하였다. 장약량과 발파 시추공심도를 4가지 유형으로 달리한 발파진동을 유발시키고, 각 유형별 발파 시 댐 정상부에서 가속도를 계측하였다.

발파진동의 자연 지진동 특성과 상이한 주파수특성에 의한 영향을 줄이고자, 주 진동 이후 댐의 자유진동감쇠에 의한 계측기록 후반부 자유진동 감쇠 시간이력만을 발췌하여 푸리에 변환하는 방식으로 대상 사력댐의 고유주기를 산정하였다. 이러한 방법으로 산정한 대상댐의 고유주기는 발파유형에 크게 영향을 받지 않고 일관성 있게 약 0.15초로 산정되어, 발파진동실험에 의한 사력댐의 고유주기 산정방법이 일관된 결과를 줄 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 산정한 대상댐의 고유주기 산정결과를 기존의 실지진 계측기록을 분석하는 방법에 의한 댐 고유주기 산정결과와 비교해 본 결과, 사력댐 높이에 따른 고유주기 산정결과에 대한 경향성과 일치하였으며, 따라서 본 연구에서 적용한 방법으로 산정한 결과가 실효성이 있음을 확인하였다.

이상의 결과로부터 지진계가 설치되지 않아 실지진 계측기록을 이용할 수 없는 경우, 인접발파에 따른 발파진동계측기록에 대한 분석으로도 사력댐의 고유주기를 실효성 있게 산정할 수 있음을 확인하였다.

본 연구결과는 실지진 계측기록을 확보할 수 없는 사력댐의 고유주기를 산정하기 위하여 인위적으로 발파진동실험을 수행해야 함을 제안하는 것이 아니지만, 댐 주변에 인접발파 공정이나 계획이 있을 경우, 발생하는 인공진동을 효과적으로 활용할 수 있다면 실효성 있게 대상댐의 고유주기를 산정할 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 향후, 폭원(진동원)의 수평위치 변화, 단발발파가 아닌 순차적 지연발파 등과 같은 다양한 유형의 발파진동에 대하여, 진동계측기록을 이용한 사력댐 고유주기 산정 연구가 추가적으로 필요할 것으로 여겨진다.

감사의 글

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

참고문헌

- 이연수, 장서일(2005) 근접장 발파진동에서 진동속도와 진동레벨의 비교, **한국소음진동공학회 논문집**, 한국소음진동공학회, 제 15권 제8호, pp. 918-923.
- 정석영, 박춘수, 홍성경, 김준호, 고재필(2002) 발파진동에 의한 매설가스관의 진동해석, **한국가스학회지**, 한국가스학회, 제6권 제1호, pp. 46-51.
- 하익수(2011) 미소지진 계측기록을 활용한 국내 사력댐 고유주기 산정방법, **한국지반환경공학회 논문집**, 한국지반환경공학회, 제 12권 제6호, pp. 53-60.
- 하익수, 이종욱, 조성은, 오병현(2008) 지진대비 댐안전관리를 위한 지진감시시스템 구축 및 계측기록 활용, **기술학술발표회 논문집**, 한국지반공학회, pp. 1389-1396.
- Davoodi, M. (2003) Dynamic characteristic evaluation of embankment dams by forced and ambient vibration, Ph.D. thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.
- Jafari, M.K. and Davoodi, M. (2006) Dynamic characteristics evaluation of Masjed Soleiman Dam using in situ dynamic tests, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 43, pp. 997-1014.
- Mejia, H., Seed, H.B. and Lysmer, J. (1982) Dynamic analysis of earth dams in three dimensions, **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, Vol. 108, No. GT12, pp. 1586-1604.
- Ohmachi, T. and Kuwano, J. (1994) Dynamic safety of earth and rockfill dams, A.A. BALKEMA/ROTTERDAM, pp. 32-49.
- Okamoto, S. (1984) Introduction to earthquake engineering, 2nd Edition, University of Tokyo press, pp. 466-477.

(접수일: 2012.5.3/심사일: 2012.6.24/심사완료일: 2012.7.3)