

# 미소지진 계측기록을 활용한 동적응답해석에 의한 댐 사력존 전단파속도 산정

하익수\* · 이수권\*\*

Ha, Ik Soo\*, Lee, Soo Gwon\*\*

## Estimation of Shear Wave Velocity of Rockfill Zone by Dynamic Analysis using Micro-earthquake Records

### ABSTRACT

The objective of this study is to estimate shear wave velocity of rockfill materials by making practical use of the micro-earthquake records which are ordinarily obtained at a domestic rockfill dam and to verify its applicability. Micro-earthquake records were obtained at the site of Heongseong dam and Soyanggang dam, which are the existing multi-purpose dams in Korea. In the previous study, the fundamental periods of each dam were already evaluated by analyzing the response spectrum of the observed records. In this study, numerical analyses varying shear moduli of rockfill zone were carried out using the acceleration histories measured at the abutment as input ground motions. From comparison between the fundamental periods calculated by numerical analyses and measured records, the shear wave velocities with depth were estimated. It is found that the effect of different earthquake events on shear wave velocity estimation for the target dam materials is negligible and the shear wave velocity can be consistently evaluated. Furthermore, comparing the shear wave velocity with the previous researchers' empirical relationships and field test results, applicability of suggested method is verified. Therefore, in case that it is impossible to conduct field tests and estimation is preliminary, the suggested method can be practically used.

**Key words :** Micro-earthquake, Rockfill dam, Dynamic numerical analysis, Fundamental period, Shear wave velocity

### 초 록

본 연구의 목적은 국내 사력댐에서 상시적으로 얻어지는 미소지진 계측기록을 적극 활용하여 댐 사력재료의 전단파속도를 산정하고 산정방법의 실효성을 확인하는 것이다. 이를 위하여 현재 운영 중인 형성댐과 소양강댐에서 계측된 미소지진기록 분석으로부터 얻어진 각 댐의 고유주기와 댐 기초부에서 계측된 가속도 시간이력을 입력하중으로 한 반복적인 동적수치해석을 수행하여 계산한 고유주기 사이의 적합조건을 만족시키는 방법으로, 사력존의 심도별 전단파속도를 산정하였다. 이러한 방법으로 산정된 전단파속도는 동일댐에 대하여 다른 지진 기록을 이용하더라도 일관된 결과를 보여줌을 확인하였고, 현장탐사 결과와 기존의 경험적 연구결과와 비교하여 그 실효성도 확인되었다. 실용적인 측면에서, 지진계가 설치된 댐이나 저수지에 대한 직접 조사가 불가하거나 예비해석 차원에서 사력존의 동적물성 확보가 필요한 경우, 본 연구에서 제시된 방법은 충분히 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**검색어 :** 미소지진, 사력댐, 동적수치해석, 고유주기, 전단파속도

\* 정회원 · 교신저자 · 경남대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyungnam University · geotech@kyungnam.ac.kr)

\*\* 경남대학교 토목공학과 석사과정 (Kyungnam University · lsgsoillab@gmail.com)

Received August 8, 2014/ revised October 14, 2014/ accepted December 29, 2014

### 1. 서론

댐에서 지진을 계측하는 목적은 지진 시와 지진발생 후 댐의 안정성을 확인하고, 내진설계의 가정을 검증하여 설계 이론을 개선 시키기 위해 댐의 동적거동에 대한 정보를 획득하는 데에 있다. 다른 구조물에 비해 그동안 댐에 대한 지진계 설치는 활발히 이루어 지지 않아 댐 부지의 지진 계측기록을 활용할 수 없었으나, 최근 지진발생 빈도 증가와 대형구조물에 대한 지진응답특성 파악에 대한 요구로부터 그 필요성이 증대되어 왔다.

일본 고베지진 이후 국내 내진설계기준 연구(MOCT, 1997)가 수행되었고, 이에 따라 2001년 댐설계기준(Ministry of Construction & Transportation)에는 내진특등급 댐의 경우에는 의무적으로 지진계를 설치하고 정상상태를 유지하여야 함을 규정하고 있다. 이러한 규정은 2009년 지진해대책법이 발효되어, 현재는 법률적 구속력까지도 부과되어 있는 상태이다. 이에 국내에서 중요한 대댐을 관리하는 관리주체(Korea Water Resources Corporation)는 설계당시 지진계가 설치되어 있지 않은 기존 댐에 지진계를 설치하는 사업을 수행하였으며, 각 댐의 지진계를 네트워크로 통합하여 효과적인 댐 부지에서의 지진 감지와 신속한 지진상황 통보를 위한 실시간지진감시시스템까지도 일부 기관에서는 구축한 상태이다(Ha et al., 2008). 그러나 계측된 지진기록은 댐 안전관리 측면에서 대응 및 점검 수준을 신속히 결정하는데 이용되고 있는 반면, 수년간 축적된 계측자료 자체의 직접적인 활용 사례는 드물어, 미소지진 계측기록을 활용하여 국내 사력댐의 고유주기를 산정한 사례(Ha, 2011)외에는 거의 전무하다고 할 수 있다.

동적해석으로부터 지진 시 사력댐의 거동을 신뢰성 있게 파악하기 위하여 선행되어야 할 작업은 합리적인 축조재료의 입력물성을 산정하는 것이다. 사력댐의 경우, 댐 체적의 90% 이상을 사력재가 차지하고 있기 때문에 특히 사력재료의 입력물성이 매우 중요하다. 동적변형해석을 위한 주요 물성은 사력재의 전단탄성계수와 감쇠비이다. 이 중, 변형과 가장 밀접한 관련이 있는 물성은 전단탄성계수이며, 특히 동적해석의 경우에는 저변형율(보통 10<sup>-3</sup>% 이하)에서의 전단탄성계수 즉 최대전단탄성계수이다(Ha et al., 2013). 저변형율에서의 전단탄성계수(최대전단탄성계수, G<sub>max</sub>)는 현장시험을 통해 대상 지반의 전단파속도를 측정하고, 측정된 전단파속도,

V<sub>s</sub>와 재료의 밀도, ρ를 이용하여 Eq. (1)에 의하여 효과적으로 산정될 수 있다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \tag{1}$$

기존댐 사력재료의 전단파속도를 산정하는 현장시험 방법으로는 시추공을 이용하는 다운홀시험(downhole test), 크로스홀시험(crosshole test), 서스펜션 PS 검증법 등이 있고 지표탐사 방법으로는 SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), MASW (Multi-channel Analysis of Surface Wave, 다중수의 수진기를 이용한 주파수영역 표면파 해석), HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Waves), 굴절법 탄성파탐사, 반사법 탄성파탐사 등이 있다(KGS, 2006). 이 중, 시추공을 이용하는 탐사기법은 댐 사력재료와 같이 큰 입경을 포함하는 재료의 경우, 시추공 형성이 어렵고 시추가 가능하다 하더라도 기존댐에 시추공을 형성하는 것은 정서적으로 매우 어렵다는 점이 고려되어, 그 적용이 매우 제한적이다. 지표탐사에 의한 방법이 대안으로 제시될 수는 있으나, 이 방법 역시 정기적인 정밀안전진단을 의무적으로 받아야 하는 국내 다목적댐과 용수전용댐 등 대댐에 대한 적용사례가 일부 있을 뿐, 그 적용사례가 드물다. 이러한 이유로 현재 국내에서는 기존댐에 대한 동적물성조사 자료가 부족하여, 동적해석시 사력존의 최대전단탄성계수 산정에 필요한 전단파속도는 대부분의 경우 Sawada and Takahashi의 경험식에 의한 방법(Sawada and Takahashi, 1975)을 적용하거나 권장되고 있는 실정이다(MLTMA, 2011; Ha et al., 2013).

Sawada and Takahashi (1975)는 일본에 위치한 높이 60m이상의 4개 대댐에 대해 수행한 현장탐사결과와 사력존 내 깊이(중력방향)에 따라 설치된 지진계 관측기록을 분석하여 댐 사력존의 심도별 전단파속도, V<sub>s</sub>를 Table 1과 같이 제안하였다(Sawada and Takahashi, 1975). 그러나 현재 국내에서 많이 적용되고 있는 이 방법은 일본에 위치한 대댐에 대해 수행된 현장시험 및 계측 결과에 기초하기 때문에 국내 댐 적용성에 대한 검증은 여전히 필요한 실정이다.

Vrymoed (1981)는 미국에 위치한 Oroville 댐의 동적해석에 필요한 축조재료의 입력물성을 평가하기 위하여, 계측지진기록을 활용하고 반복적인 수치해석을 수행함으로써 축조재료의 최대전단

Table 1. Velocity Distribution Formulae (Sawada and Takahashi, 1975)

Depth(m)	Zone	Rockfill (m/sec)		Core (m/sec)	
		Non-Saturated	Saturated	Upper bound	Lower bound
0 ~ 5		v <sub>s</sub> = 245		v <sub>s</sub> = 210	
5 ~ 30		v <sub>s</sub> = 250Z <sup>0.2</sup>	v <sub>s</sub> = 250Z <sup>0.2</sup>	v <sub>s</sub> = 180Z <sup>0.35</sup>	v <sub>s</sub> = 140Z <sup>0.34</sup>
30 ~		v <sub>s</sub> = 200Z <sup>0.315</sup>			

탄성계수(또는 전단파속도)를 산정하였다. 해당 연구에서는 댐 기초부와 댐 정상부에서 지진 시 계측된 가속도기록으로부터 댐의 동적물성과 직접적인 관계를 가지는 응답 특성인 고유주기를 평가하였으며, 이것이 수치해석 결과로부터 도출되는 고유주기와 동등한 결과를 나타낼 때 적용된 전단파속도 또는 최대전단탄성계수가 실제 댐 사력재료의 동적변형특성이라고 평가하였다(Vrymoed, 1981). 그러나 Vrymoed의 연구결과는 충분히 큰 지진 계측기록에 기초를 둔 것으로서, 국내와 같이 관측된 대부분의 지진이 미소지진 규모인 경우에 대해서는 국내 실정에 적합한 방법 및 결과를 도출할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 국내 사력댐에서 상시적으로 얻어지는 미소지진 계측기록을 적극 활용하여 댐 사력재료의 전단파속도를 산정하고 산정방법의 실효성을 확인하는 것이다. 이를 위하여 현재 운영 중인 횡성댐과 소양강댐에서 계측된 미소지진기록 분석으로부터 얻어진 각 댐의 고유주기와 댐 기초부에서 계측된 가속도 시간이력을 입력하중으로 한 반복적인 동적수치해석을 수행하여 계산한 고유주기 사이의 적합조건을 만족시키는 방법으로 사력존의 심도

별 전단파속도를 추정하였다. 수치해석 결과로 계산된 고유주기와 비교될 각 댐에서의 고유주기는 선행연구(Ha, 2011) 결과를 이용하였고, 반복적인 동적 수치해석이란 각 해석 시 사력존의 물성을 변화시킨 해석을 말한다. 산정된 전단파속도 프로파일은 기존의 경험적 제안식에 의해 산정된 것과 각 댐에서 수행된 현장 탄성파탐사(HWAW)로 얻어진 것과 비교되어, 산정 결과의 실효성과 제한성이 함께 검토되었다.

## 2. 미소지진 계측 개요 및 댐 고유주기

### 2.1 미소지진 계측 개요

본 연구에서는 2010년에 한반도 일대에서 발생하여, 본 연구의 대상댐인 횡성댐과 소양강댐에서 유효하게 계측된 기록을 남긴 지진을 그 대상 지진으로 하였다. 대상 지진의 규모는 M 2.1~M 3.0 범위였고, 대상 지진에 의해 대상 댐들의 정상부에서 계측된 상하류방향 지진가속도의 최대크기 범위는 0.00003g~0.0004g 정도 수준이었다. Table 2는 이러한 계측지진을 요약한 것이다.

Table 2. Synopsis of Measured Earthquakes

Earthquake	Time	Magnitude	Epicenter	Detailed epicenter location	
				Latitude	Longitude
B	2010-02-21 21:17	2.3	16km east of Cheonan	36.75 N	127.10 E
D	2010-02-09 18:08	3.0	8km north of Siheung	37.45 N	126.80 E
E	2010-01-23 17:54	2.1	20km north of Sangju	36.59 N	128.17 E

Table 3. Dimensions of Target Dams, Micro-Earthquake Records, Location of Accelerometers

Dam	Type	Height (m)	Length (m)	Measured earthquake (Peak acc. at crest, g) (shown in Fig. 1 & 2)	Location of accelerometers (number of accelerometers)
Hoengseong	CCR*	48.5	205	D**, E** (0.0002, 0.00003)	crest/slope/right abut. (3)
Soyanggang	CCR	123	530	B**, D** (0.0001, 0.0004)	crest/slope/right abut. (3)

\*: Center Core Rockfill, \*\*: B, D, E are shown in Table 2

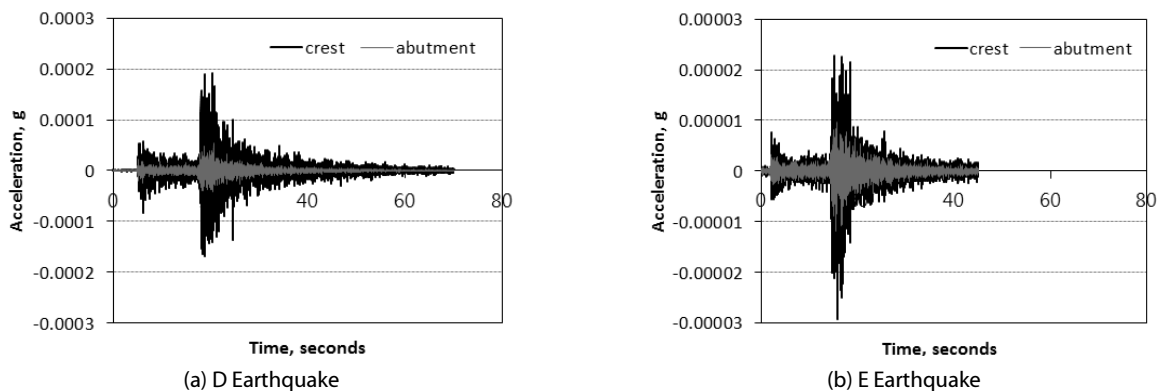


Fig. 1. Acceleration Time Histories Observed on Abutment and Crest of Hoengseong Dam

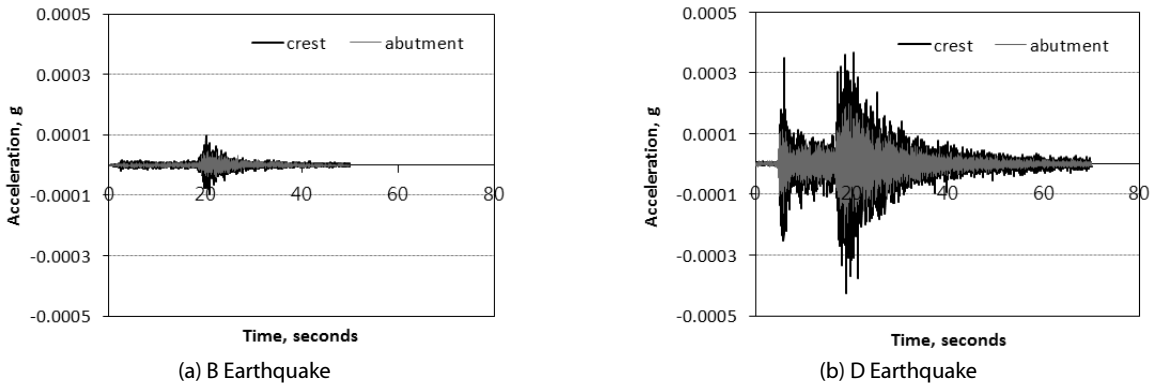


Fig. 2. Acceleration Time Histories Observed on Abutment and Crest of Soyanggang Dam

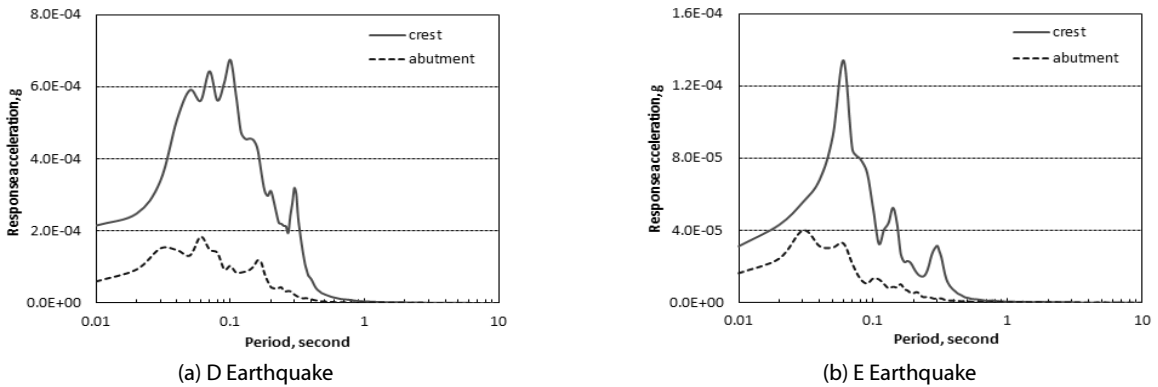


Fig. 3. Respons Spectrum of Acceleration Observed on Abutment and Crest of Hoengseong Dam (Damping Ratio, 5%)

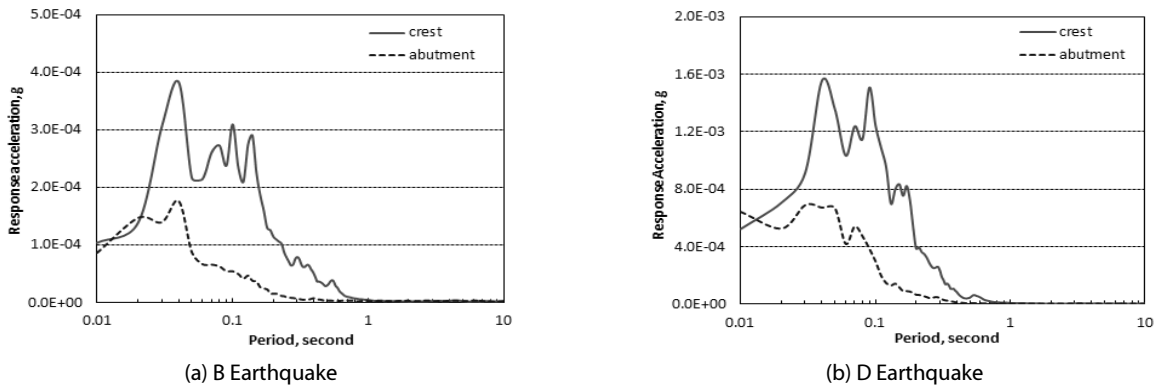


Fig. 4. Response Spectrum of Acceleration Observed on Abutment and Crest of Soyanggang Dam (Damping Ratio, 5%)

Table 2에 나타난 계측지진에 대해 계측기록을 얻은 연구 대상 사력댐은 Table 3과 같다. Table 3은 이러한 지진이 계측된 대상댐의 댐 체원, 미소지진 계측기록, 지진가속도계 설치현황을 나타낸 것이다. Figs. 1 and 2는 각각 횡성댐과 소양강댐의 어버트(abutment)와 댐 정상부에서 관측된 댐 상하류 방향 지진가속도 시간이력을 나타낸 것이며, Figs. 3 and 4는 각각 횡성댐과 소양강댐의 어버트와

댐 정상부에서 관측된 댐 상하류 방향 지진가속도의 일정감쇠비 (5%)에 대한 응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

## 2.2 계측기록으로부터 산정된 댐 고유주기

지진계측기록으로부터 댐의 고유주기를 산정하는 방법에는 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법, 댐 기초부 또는 어버트와

정상부 가속도 증폭비에 의한 방법, 댐 기초부 또는 어버트와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법 등이 있다(Mejia et al., 1982; Okamoto, 1984; Ohmachi and Kuwano, 1994; Makdisi and Seed, 1979; Ha, 2011).

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 경우 유용하며, 댐 기초부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법 또한 댐 정상부에서 계측된 가속도의 최대크기가 0.02g 이상의 지진기록에 대해 적용된 방법으로서, 국내외 같이 미소지진 계측기록을 활용하여 사력댐의 고유주기를 산정하고자 하는 경우에는 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 방법이 가장 효과적인 것으로 알려졌다(Ha, 2011). 이 방법은 댐 정상부에서 계측된 가속도 시간이력의 일정감쇠비(주로 5% 적용)에 대한 응답스펙트럼과 댐 저부(기초부 또는 양안 어버트)에서 계측된 가속도 시간이력의 일정감쇠비에 대한 응답스펙트럼의 비(ratio)를 나타내는 곡선에서, 첨두값을

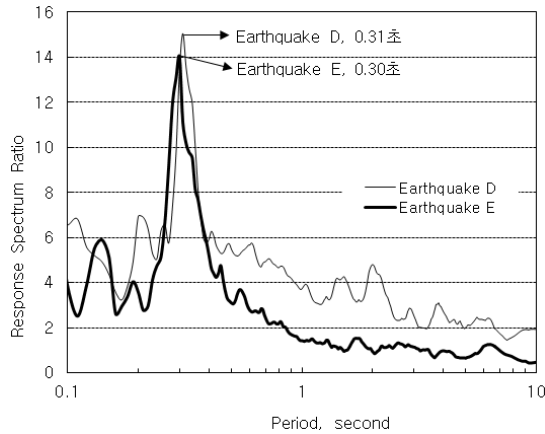
보이는 주기를 사력댐의 고유주기로 간주하는 방법이다(Ha, 2011).

상기의 방법을 이용하여 선행연구(Ha, 2011)에서 산정한 횡성댐과 소양강댐의 고유주기 산정 결과는 Fig. 5와 같다. 횡성댐의 고유주기는 D 지진 시 0.31초, E 지진 시 0.30초이며, 소양강댐의 고유주기는 B 지진 시 0.55초, D 지진 시 0.58초이다.

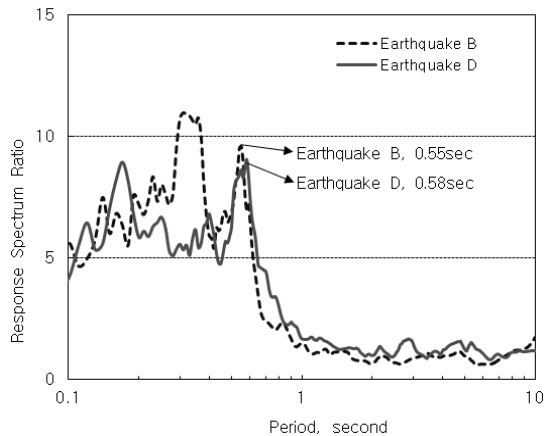
### 3. 계곡효과(canyon effect)와 댐 고유진동수

기존의 연구결과(Hatanaka, 1955; Ambraseys, 1960; Makdisi, 1976)에 의하면 댐의 동적응답에 대한 경계조건이 미치는 주요 사항은 양안 경계의 계곡효과이며, 이는 댐의 동적응답에 대한 구조적 강성을 증가시킨다. 이러한 효과는 평면변형을 조건하의 댐에 비해 계곡에 위치한 댐에서의 고유진동수가 더 크게 나타나는 것으로 반영될 수 있다.

Fig. 6은 Ambraseys (1960)의 연구결과 이후, Mejia and Seed (1983)의 연구결과에서 수치적 해석 결과를 바탕으로 정리, 제시한 사항으로 사다리꼴 형태(trapezoidal type)의 댐인 경우 댐의 높이에 대한 길이 비에 따라 댐의 3차원 모델과 2차원 모델의 해석결과가 나타내는 고유진동수 비를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 3차원 모델 해석에 의해 산정된 고유진동수는 2차원 모델 해석으로 산정한 고유진동수에 비해 크며, 댐의 길이/높이 비가 3 보다 큰 경우에는 2차원 모델 해석결과에 비해 약 20% 정도 더 크게 평가(고유주기는 약 20% 정도 작게 평가)되었음을 알 수 있다. 이러한 효과는 앞서 언급된 계곡효과에 의한 영향이라고 할 수 있다(Ha et al., 2013). 본 연구의 대상댐인 횡성댐과 소양강댐의 댐길이/높이 비는 Table 3에서 볼 수 있듯이, 각각 4.2와 4.3으로서, 모두 3을 초과한다.



(a) Hoengseong Dam



(b) Soyanggang Dam

Fig. 5. Evaluation of Fundamental Periods of Each Dam using Response Spectrum Ratio (Ha, 2011)

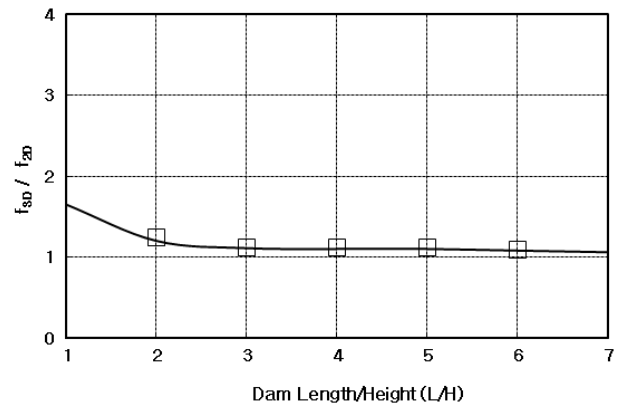


Fig. 6. Comparison between Fundamental Natural Frequencies Computed from 2-D and 3-D Models of Dams in Rectangular Canyons (Ambraseys, 1960)

#### 4. 댐 2차원 동적응답해석 개요

본 연구에서 2차원 동적응답해석은 필댐의 동적해석에 국내외에서 가장 널리 사용되고 있는 지반해석 프로그램인 FLAC2D (Version 7.0) (Itasca Consulting Group, 2011)를 사용하였다. FLAC2D는 시간영역에서 동적문제의 해를 구하는 유한차분해석 프로그램으로서, 매 분할 해석시간(timestep)에 모든 절점(node)에

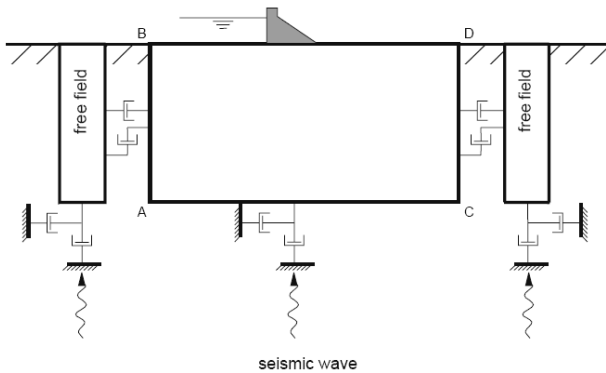


Fig. 7. Free Field Boundary Condition for Dynamic Analyses (Itasca Consulting Group, 2011)

서 운동방정식의 해를 구한다.

경계조건은 해석경계면에서 비반사(non-reflecting) 특성을 가질 수 있도록 자유장운동을 강제하는 자유장경계조건(free-field boundary condition)을 적용하였다(Fig. 7 참조). Fig. 7에서 보는 바와 같이 해석영역의 측면경계는 흡수경계를 모사할 수 있도록 자유장 해석절점들과 점성댐퍼(viscous dashpot)로 연결되어 있다.

동적해석을 위한 입력하중은 각 지진 시 횡성댐과 소양강댐 어버트에서 계측된 가속도 시간이력(Figs. 1 and 2 참조)이 댐 바닥에 가해질 수 있도록, 각 지진에 대하여 deconvolution된 가속도 시간이력을 해석영역 바닥에 입력하였다(Fig. 8 참조). 횡성댐과 소양강댐 기반암의 전단탄성계수는 각 댐 코어재의 전단탄성계수와 사력재의 초기 전단탄성계수에 비해 그 값이 500배 이상으로서, 임피던스(impedance)의 차가 매우 크므로 강성 기초지반(rigid base)로 간주될 수 있다. 이러한 강성 기초지반에 대한 deconvolution은 1차원 등가선형 지반응답해석 프로그램인 SHAKE (Shnabel et al., 1972)를 이용한 Mejia and Dawson (2006)의 방법과 절차를 이용하였다. 이 방법은 반무한 평면을 가정할 만큼 연장된 두께를 갖는 기반암 1차원 단면에 대하여, 해당 단면의 상부에서의 응답가속도가 2차원해석 시 댐체 바닥에 입력하고자 하는 가속도 시간이력과 동일하도록 1차원 지반응답해석을 수행한다. 그리고 1차원 지반

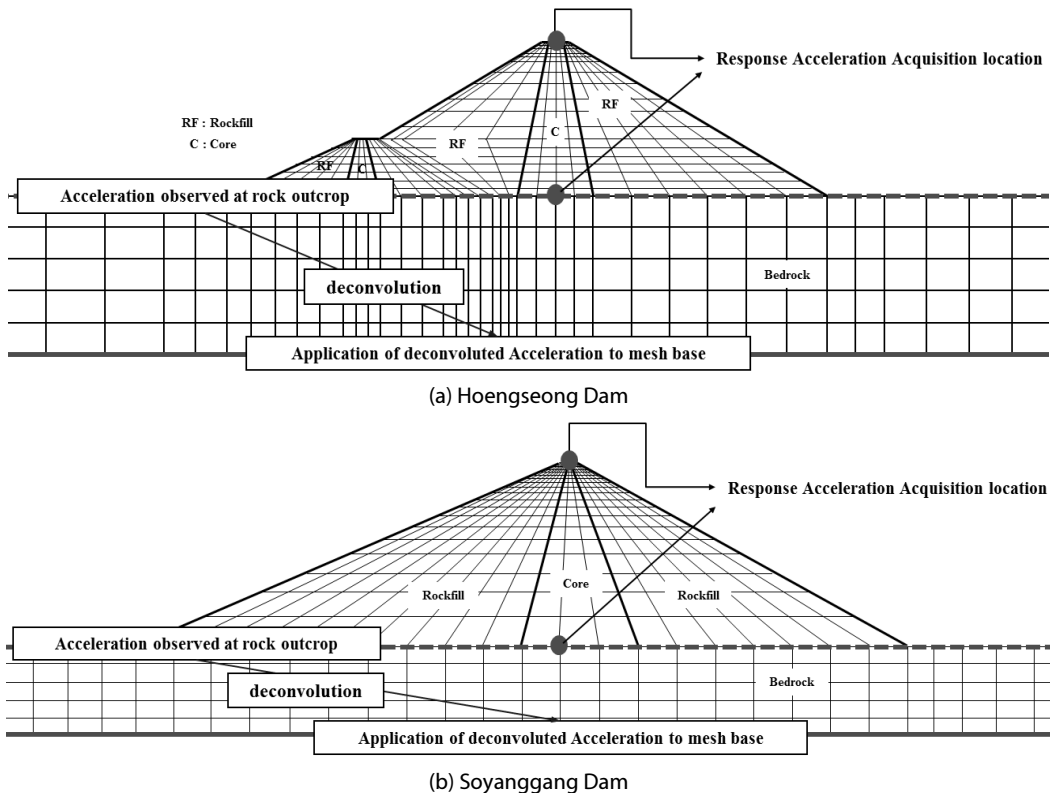


Fig. 8. 2-D finite Difference Grid, the Position where Input Motion is Applied, and the Point where Dam Response is Obtained

응답해석 결과로 얻어진, 2차원 해석 시 기반암 바닥 깊이와 동일한 깊이에서 산정된 가속도시간이력을 FLAC 해석바닥면에 가속도 시간이력으로 입력하는 방법이다(Mejia and Dawson, 2006).

Fig. 8은 정적해석과 동적해석을 위한 황성댐과 소양강댐의 해석요소망, 입력하중 작용위치, 정상부응답 기록 위치를 나타낸 것이다. 지반해석 모델은 지반재료가 항복하기 이전에는 선형탄성 거동을 하는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. Mohr-Coulomb 지반모델을 사용한 이유는 수치해석에 의한 최대전단탄성계수의 산정 용이성과 함께 실제 댐체에 발생할 수 있는 전단변형률의 수준이 입력하중이 미소지진이므로 탄성범위내의 값일 것으로 예상되기 때문이다. 계측기록만으로 댐체에 발생한 최대 전단변형률을 근사적으로 추정해 보기 위하여, 각 댐의 각 지진에 대해 나타난 댐 정상부에서의 가속도 계측기록(Figs. 1 and 2 참조)을 적분하여 계략적으로 정상부에서의 최대 수평변위를 산정해 보았다. 산정된 최대 수평변위로부터 최대 전단변형률을 산정하였는데, 가장 큰 값은 D 지진 시 소양강댐에서 발생된 것으로, 산정한 정상부에서의 최대 수평변위는 0.175mm이고, 최대단면의 댐 높이가 123m이므로 전단변형률은  $1.42 \times 10^{-4}\%$  ( $0.000175/123 = 1.42 \times 10^{-6}$ )로 추정해 볼 수 있다. 이러한 전단변형률은  $10^{-3}\%$ 이하의 미소변형률로서 기존의 연구결과(Fig. 9 참조)를 참고하면, 지진 동안에 댐체의 거동은 탄성거동을 가정할 수 있다.

동적해석 수행 전에 댐의 초기 응력상태를 구현하기 위한 정적해석을 수행하였다. 정적해석을 위한 입력물성은 황성다목적댐 공사지(Kwater, 2002)와 소양강다목적댐 공사지(Kwater, 1973)에 작성된 설계값을 적용하였다.

동적해석을 위한 입력물성으로는 기반암의 경우에는 정적해석

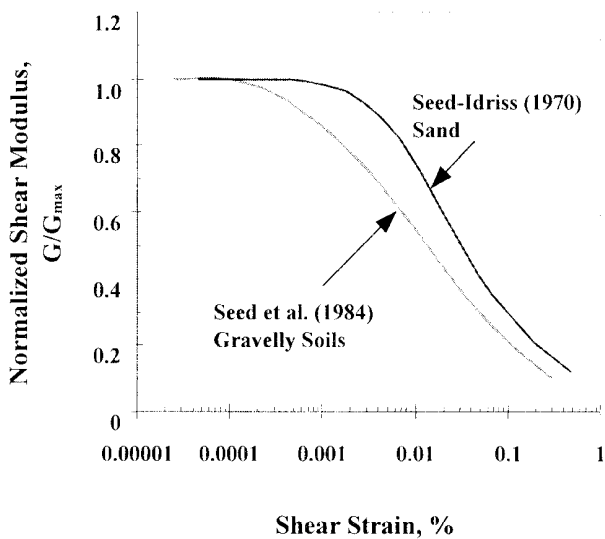


Fig. 9. Normalized Shear Modulus Reduction Curves for Sand and Gravelly Soils (Seed and Idriss, 1970; Seed et al., 1984)

입력물성을, 코어존의 경우에는 두 댐 모두 코어존의 부피가 전체 댐 부피의 약 8%내로 작기 때문에 전단탄성계수는 Sawada and Takahshi (1975)의 코어존의 깊이별 전단파속도 분포 하한 공식 (Table 1 참조)에 의한 댐 높이에 따른 평균값에 Eq. (1)과 같이 코어존의 밀도를 곱하여 최대전단탄성계수를 정하고 포아송비는 0.3을 적용하여 체적탄성계수를 일정값으로 입력하였다. 역산을 하게 될 사력존의 경우, 최대전단탄성계수는 Eq. (2)로 표현될 수 있는데, 본 연구에서는  $k_{2,max}$ 를 여러 가지로 변화시킨 값(황성댐의 경우, 100~130, 소양강댐의 경우, 100~200)을 사용하였으며, 체적탄성계수는 산정된 전단탄성계수에 포아송비 0.3을 적용하여 산정하였다.

$$G_{max} = k_{2,max} \cdot 1000 \cdot \sqrt{\sigma'_m}$$

(단위: psf) (Seed and Idriss, 1970) (2)

여기서,  $\sigma'_m$ 은 평균유효구속응력이며, 정적해석으로부터 산정되고, 단위는 psf (lb/ft<sup>2</sup>)이다.

저변형률 하에서 수행되는 동적해석은 적절한 감쇠비의 적용이 중요하다. 본 해석에서의 감쇠는 Rayleigh Damping을 적용하였다. Rayleigh Damping은 아래 Eq. (3)과 같은 질량에 의한 감쇠와 강성에 의한 감쇠의 합을 나타내는 행렬(matrix) 형식으로 표현된다.

$$C = \alpha M + \beta K$$

(3)

여기서,  $C$ 는 감쇠행렬(damping matrix),  $M$ 은 질량행렬,  $K$ 는 강성행렬,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 질량 비례 Rayleigh상수, 강성비례 Rayleigh상수를 나타낸다.

이러한 Rayleigh Damping은 진동수에 따라 값의 차이를 보이는데, 최소가 되는 경우의 Rayleigh 상수값은 각각 다음 Eq. (4)로 표시된다(Chopra, 1995; Itasca Consulting Group, 2011).

$$\alpha = \xi_{min} 2\pi f_{min}, \quad \beta = \frac{\xi_{min}}{2\pi f_{min}}$$

(4)

여기서,  $\xi_{min}$ 은 최소 감쇠비이며,  $f_{min}$ 은 최소 고유진동수 즉, 고유진동수에 해당된다.

본 해석에서는 최소 고유진동수,  $f_{min}$ 은 2.2절에서 산정한 고유주기를 이용하여 적용하였고, 최소 감쇠비,  $\xi_{min}$ 은 지반재료에 대하여 일반적으로 가정하는 5%를 적용하였다. 이렇게 산정된  $\xi_{min}$ 과  $f_{min}$  값을 Eq. (4)에 대입하여 Rayleigh 상수  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 각각 결정하였다.

### 5. 2차원 동적응답해석 결과 분석 및 사력존 전단파속도 산정

각 댐에서 각 지진에 대하여 댐 기초에서 계측된 가속도 시간이력을 입력하중으로 하고, 해석 시 Eq. (2)의  $k_{2,max}$  를 횡성댐의 경우, 100, 110, 115, 120, 130, 소양강댐의 경우, 100, 120, 150, 180, 190, 200으로 변화시킨 반복적 2차원 동적 수치해석을 수행하였다. 동적해석 결과로부터 얻어진 댐 저부와 정상부의 응답가속도 시간이력에 대하여, 2.2절에서 설명한 계측기록으로부터 댐의 고유주기를 산정하는 방법과 동일한, 동적해석 결과로 얻어진 댐 저부와

정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 방법을 적용하여 댐의 고유주기를 각각 산정하였다.

Figs. 10 and 11은 이러한 절차로부터 횡성댐과 소양강댐의 고유주기를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 2.2절에서 제시한 바와 같이 계측기록으로부터 산정된 횡성댐의 고유주기는 D 지진과 E 지진에 대해서 각각 0.31초와 0.30초이었고, 소양강댐의 고유주기는 B 지진과 D 지진에 대해서 각각 0.55초와 0.58초이었다. 이 값은 앞서 설명한 3차원 계곡효과가 고려된 실제 댐에서의 고유주기이므로 2차원 동적해석의 경우에는 이 값보다 약 20%

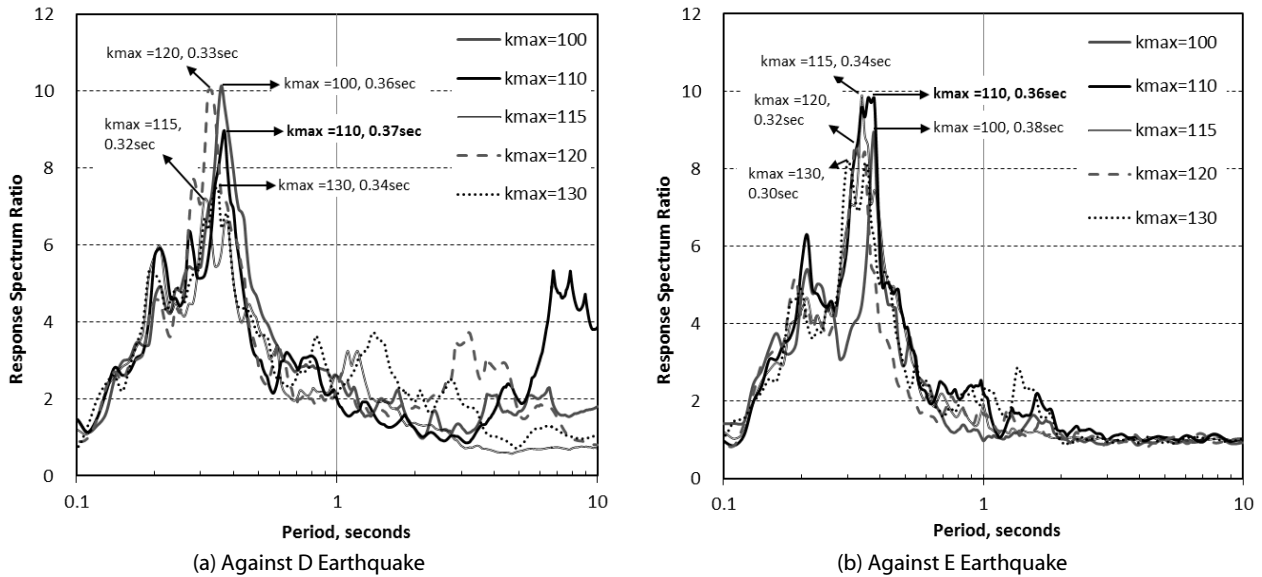


Fig. 10. Response Spectrum Ratio Curves of Hoengseong Dam for Various  $k_{2,max}$

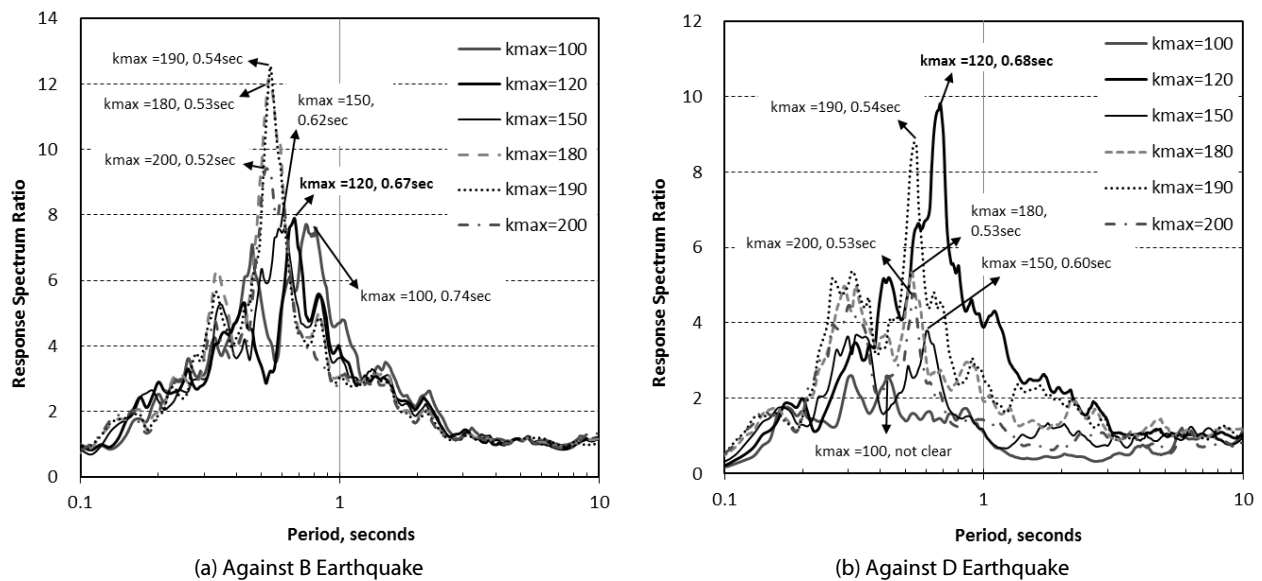


Fig. 11. Response Spectrum Ratio Curves of Soyanggang Dam for Various  $k_{2,max}$



큰 값을 나타내는 고유주기를 가지게 될 때의 전단탄성계수,  $G_{max}$ 를 선정하여야 한다(Vrymoed, 1981).

Fig. 10에서 알 수 있듯이, 두 가지 지진에 대하여  $k_{2,max}=110$ 일 때 횡성댐의 고유주기는 각각 0.37초와 0.36초로서 계측된 미소지진기록 분석으로부터 산정된 고유주기 0.31초와 0.30초의 약 20% 큰 값에 해당되는 것으로 나타났다. 즉, 두 가지 다른 지진에 대하여도 사력존의 강성을 나타내는  $k_{2,max}=110$ 인 경우가 일관성 있게 3차원 계곡효과를 반영한 댐의 고유주기와 2차원 동적해석에 의한 고유주기와의 적합조건을 만족시킴을 확인할 수 있었다. 그러므로  $k_{2,max}=110$ 인 경우가 횡성댐 사력재료의 동적물성을 대표하는 값이라 판단할 수 있다. 마찬가지로, Fig. 11에서 알 수 있듯이, 소양강댐의 경우에는  $k_{2,max}=120$ 인 경우가 사력재료의 동적물성을 대표하는 값이라 판단할 수 있다.

동적해석결과를 통해 사력존의 깊이별 최대전단탄성계수를 산정하고, 산정된 최대전단탄성계수를 Eq. (1)을 이용하여 깊이별 전단파속도로 환산하였다( $v_s = \sqrt{G_{max}/\rho}$ ,  $\rho$ 는 밀도).

횡성댐의 경우,  $k_{2,max}=110$ 인 경우에 대하여 심도별 사력재료 전단탄성계수를 Fig. 12(a)와 같이, 소양강댐의 경우,  $k_{2,max}=120$ 인 경우에 대하여 Fig. 12(b)와 같이 해당 해석요소소망의 각 해석요소(elements)에서 추출하여 깊이별 전단파속도로 환산하였다.

Fig. 12(a)와 같이 횡성댐의 경우, 물성추출 방향을 두 가지 방향(1: 댐 사면에 법선방향, 2: 댐 사면에서 연직하향 방향)으로 정하였는데, 그 이유는 '1'방향의 경우, HAWW 현장시험(Fig. 13(a) 참조) 결과(Kwater, 2008)와, '2'방향의 경우, 기존의 경험식(Sawada and Takahashi, 1975)과 비교하기 위한 물성 추출 방향과 일치시키기 위한 것이다. Fig. 12(b)와 같이 소양강댐의 경우는 물성추출 방향을 한 가지로만 정하였는데, 역산 결과와 비교하기 위한 HAWW 현장시험(Fig. 13(b) 참조) (Kwater, 2009)과 기존의 경험식의 물성 추출 방향이 댐 사면에서 연직하향 방향으로 모두 동일하였기 때문이다.

Fig. 14는 횡성댐에 대하여 역산한 결과를 현장시험 결과와 기존의 Sawada and Takahashi의 경험식에 의해 산정된 결과와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 14(a)에서 역산결과가 5~15m 심도에서는 현장시험 결과에 비해 과대 산정하나, 5m 이하와 15m 이상의 심도에서는 탐사결과와 거의 유사한 것을 알 수 있다. Fig. 14(b)에서 역산결과는 기존의 경험식으로 산정된 결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림으로 제시되지는 않았으나 참고로,  $k_{2,max}$  값의 변화(100~130)에 따라, 댐 사면에 법선방향 심도 33m에서 산정된 전단파속도의 범위는 485~550m/sec, 댐 사면에서 연직하향 방향 심도 26m에서 산정된 전단파속도의 범위는

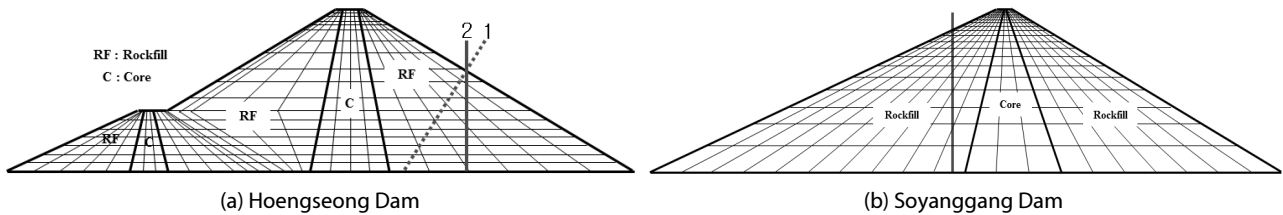


Fig. 12. Location where Shear Moduli were Extracted

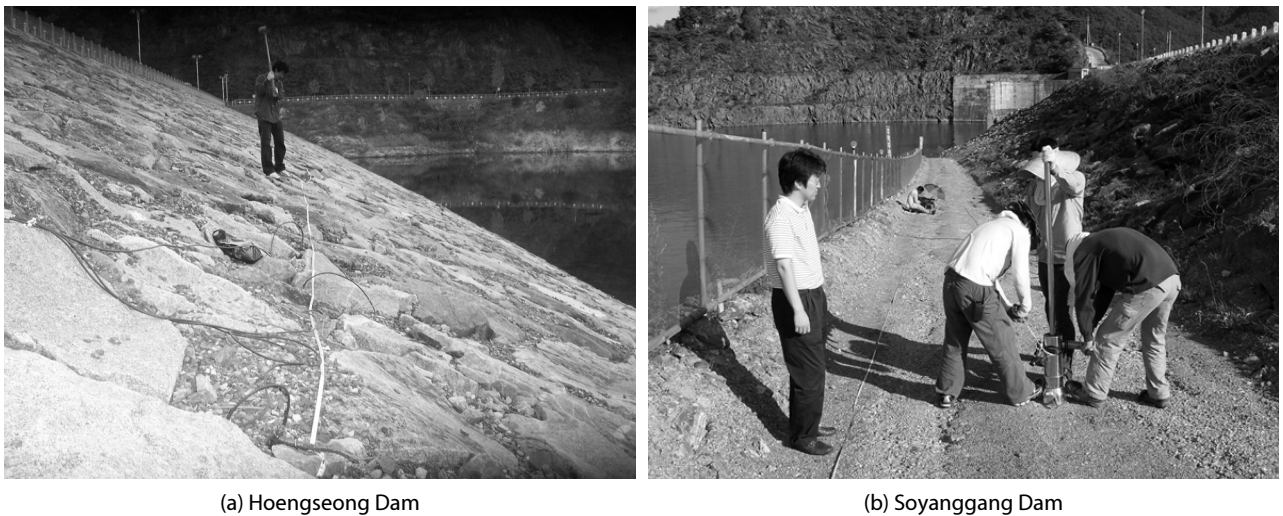


Fig. 13. HAWW Survey Views (Kwater, 2008; Kwater, 2009)

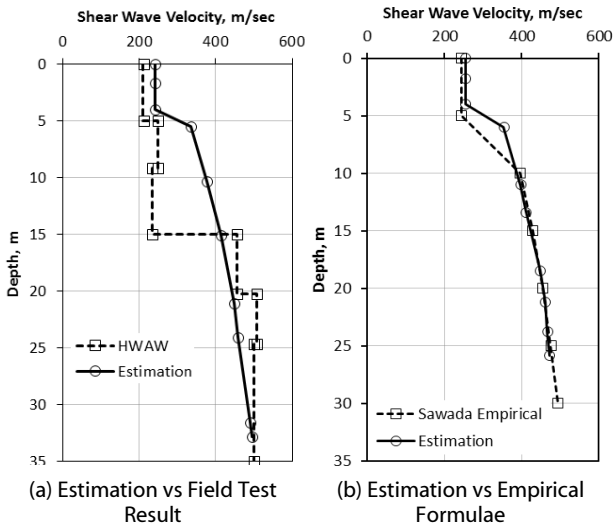


Fig. 14. Estimation of Shear wave Velocity Profile in the Rockfill Zone of Hoengseong Dam

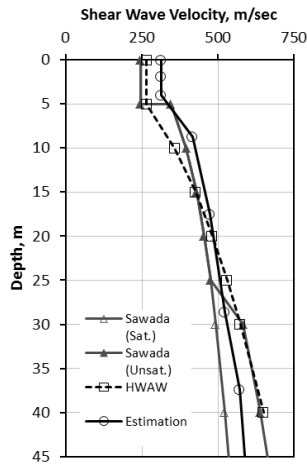


Fig. 15. Comparison of Shear wave Velocity Profile in the Rockfill Zone of Soyanggang Dam Estimated by Back Calculation with that Calculated by Empirical Formulae and Field Test (HAWA) Results

440~495m/sec이었다.

Fig. 15는 소양강댐에 대하여 역산한 결과를 현장시험 결과와 기존의 경험식에 의해 산정된 결과와 함께 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 15에서 HAWA 탐사결과는 경험식 중 불포화 상태의 경험식에 의한 결과와 유사한 결과를 보인다. 역산결과는 20m 이하의 심도까지는 현장시험과 경험식에 의한 산정결과보다 다소 전단파속도를 크게 산정하는 것으로 나타났고, 20m 이상의 심도에서는 경험식에 의한 산정결과 중 포화 상태와 불포화 상태의 중간 정도의 값을 산정하는 것으로 나타났다. 마찬가지로 그림으로 제시되지는 않았으나 참고로,  $k_{2,max}$  값의 변화(100~200)에 따라, 댐 사력면에서 연직하향

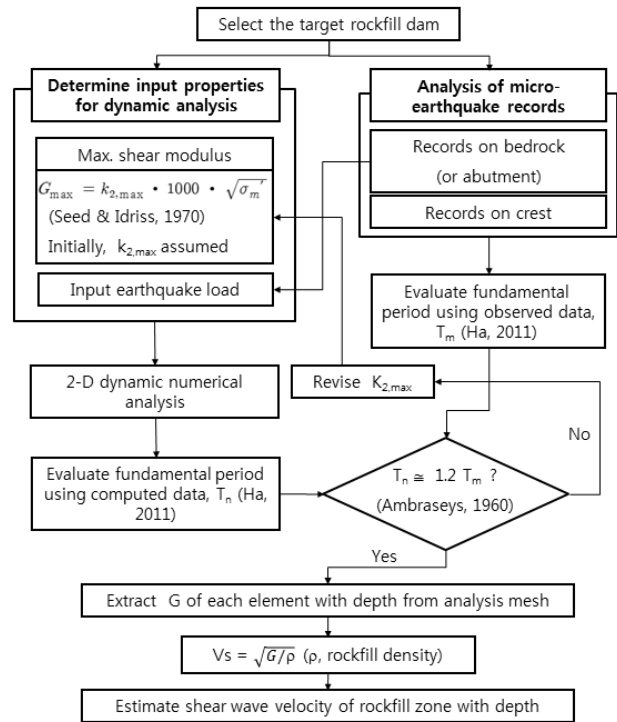


Fig. 16. Procedures for Estimating Shear wave Velocity of Rockfill Zone by Dynamic Analysis using Micro-Earthquake Records

방향 심도 38m에서 산정된 전단파속도의 범위는 495~700m/sec 이었다.

Figs. 14 and 15의 결과로부터, 미소지진 계측기록을 이용한 사력면의 전단파속도 산정결과는 현장시험으로 산정한 결과에 비해서는 작고, 경험식에 의한 산정한 결과와는 거의 유사한 결과를 보임을 알 수 있었다. 이러한 점을 감안하고 실용적인 측면에서, 지진계가 설치된 다른 댐이나 저수지에 대한 직접 조사가 불가하거나 예비해석 차원에서 사력면의 동적물성 확보가 필요한 경우, 본 연구에서 제시한 방법은 충분히 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 댐 사력면의 전단파속도를 산정하기 위하여, 댐에서 상시적으로 얻어지는 미소지진 계측기록을 적극 활용하는 방안을 모색하였다. 현재 운영 중인 횡성댐과 소양강댐, 2개의 사력면에서 계측된 미소지진기록을 활용하고, 반복적인 동적수치 해석을 수행하여 각 댐 사력면의 심도별 전단파속도를 산정하였으며, 그 결과를 현장탐사 및 기존의 경험식에 의한 산정결과와 비교해 보았다. 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 횡성댐과 소양강댐에서 얻어진 미소지진 계측기록을 분석하여

사력댐의 고유주기를 산정하고, 예측된 가속도기록으로 산정한 고유주기와 댐 기초부에서 예측된 가속도 시간이력을 입력하중으로 한 반복적인 동적수치해석으로 계산한 고유주기 사이의 적합조건을 만족시키는 방법으로, 각 댐 사력존의 심도별 전단파속도를 산정하였다. 그리고 이러한 미소지진 예측기록을 활용하여 댐 사력존의 심도별 전단파속도를 산정하는 절차를 제시하였다(Fig. 16 참조).

- (2) 본 연구에서 제시한 방법으로 산정한 횡성댐과 소양강댐 사력재료의 전단파속도는 미소지진인 경우, 각기 다른 2개의 지진에 대해 크게 영향을 받지 않고 일관성 있는 값을 산정하는 것으로 나타나, 제시한 방법으로 산정된 댐 사력존의 전단파속도 산정방법이 일관된 결과를 줄 수 있음을 확인하였다.
- (3) 본 연구에서 산정한 대상댐 사력재료 전단파속도 산정결과를 HAWW 현장탐사 결과와 국내에서 가장 널리 사용하고 있는 Sawada and Takahashi의 경험식에 의해 산정된 결과와 비교한 결과, 현장시험으로 산정한 결과에 비해서는 작고, 경험식을 이용해 산정한 결과와는 거의 유사한 결과를 보였다.
- (4) 실용적인 측면에서, 지진계가 설치되어 예측기록 확보가 가능한 댐이나 저수지에 대하여, 직접 조사가 불가하거나 예비해석 차원에서 사력존의 동적물성을 확보하고자 하는 경우, 경험식에 의한 추정 방법을 적용하는 것보다 대상댐에서 직접 획득한 자료를 활용하는 본 연구에서 제시한 방법을 적용하는 것이 보다 실효성이 있다고 판단된다.

본 연구결과는 동일한 연구방법으로 7개의 사력댐에 대하여 수행한 연구내용 중, 현장탐사가 수행되어 그 결과를 얻을 수 있었던, 횡성댐과 소양강댐 2개 댐에 대한 연구결과만을 보여준 것으로, 향후 나머지 5개 댐에 대한 보다 엄밀한 현장탐사 결과를 추가 확보한다면, 제시한 방법과 현장탐사 결과와의 보다 명확한 상관성이 규명될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 2013년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2013R1A1A2005122) 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### References

Ambraseys, N. N. (1960). "On the shear response of a two dimensional wedge subjected to an arbitrary disturbance." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 50, pp. 45-56.  
 Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures : Theory and Application*

*of Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc., pp. 416-421.  
 Ha, I. S. (2011). "Evaluation for fundamental periods of domestic rockfill dams with micro-earthquake records." *J. of Korean Geo-Environmental Society*, KGES, Vol. 12, No. 6, June, pp. 53-60 (in Korean).  
 Ha, I. S., Kim, N. R. and Lim, J. Y. (2013). "Estimation of shear wave velocity of earth dam materials using artificial blasting vibration test." *J. of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 33, No. 2, March, pp. 619-629 (in Korean).  
 Ha, I. S., Lee, J. W., Cho, S. E. and Oh, B. H. (2008). "Development of dam earthquake monitoring system and application of earthquake records for dam safety management against earthquake." *Proc. of Korean Geotechnical Society*, KGS, October, pp. 1389-1396 (in Korean).  
 Hatanaka, M. (1955). "Fundamental considerations on the earthquake resistant properties of the earth dam." *Bulletin No. 11*, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan (in Japanese).  
 Itasca Consulting Group (2011). *FLAC-Fast lagrangian analysis of continua*, Version 7.0, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota. USA.  
 Korea Water Resources Corporation (Kwater) (1973). *Construction report for Soyonggang multi-purpose Dam* (in Korean).  
 Korea Water Resources Corporation (Kwater) (2002). *Construction report for Heongseong multi-purpose Dam* (in Korean).  
 Korea Water Resources Corporation (Kwater) (2008). *3-dimensional evaluation of weak points of dam for earthquake and reinforcement(I)*, Report ID KIWE-DSRC-08-08, Kwater Institute, pp. 113-115 (in Korean).  
 Korea Water Resources Corporation (Kwater) (2009). *3-dimensional evaluation of weak points of dam for earthquake and reinforcement(II)*, Report ID KIWE-DSRC-09-07, Kwater Institute, pp. 29-38 (in Korean).  
 Korean Geotechnical Society (KGS) (2006). *Seismic design for earth structures*, Series No. 8, Goomibooks, pp. 51-197 (in Korean).  
 Makdisi, F. I. (1976). *Performance and analysis of earth dams during strong earthquake*, thesis presented of the University of California at Berkeley.  
 Makdisi, F. I. and Seed, H. B. (1979). "Simplified procedure for evaluating embankment response." *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. GT 12, pp. 1427-1434.  
 Mejia, H., Seed, H. B. and Lysmer, J. (1982). "Dynamic analysis of earth dams in three dimensions." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 108, No. GT 12, pp. 1586-1604.  
 Mejia, L. H. and Dawson, E. M. (2006). "Earthquake deconvolution for FLAC in FLAC and numerical modeling in geomechanics." *Proc. of the 4<sup>th</sup> International FLAC Symposium*, Madrid, Spain, pp. 211-219.  
 Mejia, L. H. and Seed, H. B. (1983). "Comparison of 2-D and 3-D dynamic analyses of earth dams." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 11, pp. 1383-1398.  
 Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (1997). *Study on seismic design criterion* (in Korean).  
 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011).

- Dam design criterion*, pp. 223-224 (in Korean).
- 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*, 2<sup>nd</sup> Edition, University of Tokyo Press, pp. 466-477.
- Sawada, Y. and Takahashi, T. (1975). "Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams." *Proc. of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, pp. 695-702.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972). *SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*, Report No. EERC 71-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California Berkeley, California.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970). *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California Berkeley, California, pp. 1-43.
- Seed, H. B., Robert, T. W., Idriss, I. H. and Tokimatsu, K. (1984). *Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soils*, Report No. EERC 84-14, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California Berkeley, California.
- Vrymoed, J. (1981). "Dynamic FEM model of Oroville dam." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 8, pp. 1057-1077.