

## 인공발파진동실험을 이용한 흙댐 축조재료의 전단파속도 산정

하익수\* · 김남룡\*\* · 임정열\*\*\*

Ik-Soo Ha\*, Nam-Ryong Kim\*\*, Jeong-Yeul Lim\*\*\*

### Estimation of Shear Wave Velocity of Earth Dam Materials Using Artificial Blasting Vibration Test

#### ABSTRACT

The objective of this study is to estimate shear wave velocity of earth dam materials using artificially generated vibration from blasting events and to verify its applicability. In this study, the artificial blasting and vibration monitoring were carried out at the site adjacent to Seongdeok dam, which is the first blasting test for an existing dam in Korea. The vibrations were induced by 4 different types of blasting with various depths of blasting boreholes and explosive charge weights. During the tests, the acceleration time histories were recorded at the bedrock adjacent to the explosion and the crest of the dam. From frequency analyses of acceleration histories measured at the crest, the fundamental frequency of the target dam could be evaluated. Numerical analyses varying shear moduli of earth fill zone were carried out using the acceleration histories measured at the bedrock as input ground motions. From the comparison between the fundamental frequencies calculated by numerical analyses and measured records, the shear wave velocities with depth, which are closely related to shear moduli, could be determined. It is found that the effect of different blasting types 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, the applicability of suggested method is verified. Therefore, in case that the earthquake record is not available, the shear wave velocity of earth dam materials can be reasonably evaluated if blasting vibration test is allowed at the site adjacent to the dam.

**Keywords :** Blasting vibration, Shear wave velocity, Dam, Fundamental frequency, Dynamic numerical analysis

#### 초 록

본 연구의 목적은 인공 발파진동실험을 이용하여 흙댐 축조재료의 전단파속도를 추정하고 산정 방법의 실효성을 확인하는 것이다. 이를 위하여 운영 중인 성덕댐에 대하여 국내 최초로 실대규모 근접 발파진동 실험을 수행하였다. 장약량과 발파 시추공심도를 4가지 유형으로 달리한 발파진동을 유발시키고, 각 유형별 발파 시에 폭원에 인접한 기반암노두와 댐 정상부에서 가속도를 각각 계측하였다. 발파진동실험으로부터 댐 정상부에서 얻어진 계측기록을 주파수 분석하여 대상댐의 고유진동수를 산정하고, 계측된 가속도기록으로 산정한 고유진동수와 기반암에서 계측한 발파파 가속도를 입력하중으로 한 반복적인 동적수치해석을 수행하여 계산한 고유진동수를 일치시키는 방법으로, 흙댐 성토재료의 심도별 전단파속도를 추정하였다. 산정된 대상댐 성토재료의 전단파속도는 발파유형에 영향을 받지 않고 일관성 있는 결과를 산정함을 확인하였고, 기존의 경험적 연구결과와 비교하여 그 실효성도 확인하였다. 이로부터 지진계가 설치되지 않아 실지진 계측기록을 이용할 수 없는 중소규모 댐의 경우, 인접발파에 따른 발파진동계측기록에 대한 분석으로도 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 추정할 수 있음을 확인하였다.

**검색어 :** 발파진동, 전단파속도, 댐, 고유진동수, 동적수치해석

\* 정회원 · 경남대학교 토목공학과 (geotech@kyungnam.ac.kr)

\*\* 정회원 · 교신저자 · K-water연구원 (Corresponding Author · K-water Institute · namryong@kwater.or.kr)

\*\*\* K-water연구원 (passion@kwater.or.kr)

Received July 31 2012, Revised October 1 2012, Accepted December 26 2012

### 1. 서론

사력댐(rockfill dam), 흙댐(earth dam)과 같은 필댐(fill dam)의 지진하중에 대한 안정성을 평가하는 일반적인 방법으로는 등가정적 사면안정해석법과 수치해석에 의한 동적해석법이 있다. 과거에는 경험적 방법인 등가정적해석법이 보수적 해석법으로 채택되어 왔으나 적정지진 규모와 기술적 조건이 충분히 고려되지 못했기 때문에 보다 과학적이고 이론적인 동적해석법의 적용이 최근 보편적인 추세이다(MLTM, 2011).

동적해석으로부터 필댐의 거동을 신뢰성 있게 파악하기 위하여 선행되어야 할 작업은 합리적인 축조재료의 입력물성을 산정하는 것이다. 동적변형해석을 위한 주요 물성은 축조재료의 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. 저변형율에서의 전단탄성계수를 효과적으로 산정할 수 있는 방법은 현장시험을 통해 대상 지반의 전단파속도를 측정하고, 측정된 전단파속도, V<sub>s</sub>와 재료의 밀도, ρ를 이용하여 식 (1)과 같이 최대전단탄성계수, G<sub>max</sub>를 산정할 수 있다.

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

기존댐 축조재료의 전단파속도를 산정하는 현장시험 방법으로 는 시추공을 이용하는 다운홀시험(downhole test), 크로스홀시험(crosshole test), 서스펜션 PS 검증법 등이 있고 시추를 하지 않는 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 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 방법은 다목적댐과 용수전용댐 등 대댐(large dam)에 대한 적용사례가 있을 뿐, 중소규모 댐에 대한 적용사례는 극히 드물다. 이러한 이유로 현재 국내에서는 기존댐에 대한 동적물성조사 자료가 부족하여, 동적해석시 축조재료의 최대전단탄성계수 산정에 필요한 전단파속도는 대부분의 경우에 Sawada & Takahashi의 경험식에 의한 방법(Sawada & Takahashi, 1975)을 적용하거나 권장되고 있는 실정이다(MLTM, 2011).

Sawada & Takahashi(1975)는 일본에 위치한 Kinsenyama 댐(높이 95m), Shimokotori 댐(높이 107m), Niikappu 댐(높이 102.8m), Tataragi 댐(높이 64.5m)에 대해 시추공을 이용하여 측정된 탄성파속도, 굴절법 지표탐사와 축조재료 깊이에 따라 설치된 지진계 관측기록을 분석하여 댐 코어존과 사력존의 심도별 전단파속도, V<sub>s</sub>를 Table 1과 같이 제안하였다(Sawada & Takahashi, 1975). 그러나 현재 국내에서 많이 적용하고 있는 이 방법은 일본에 위치한 댐에 대해 수행된 현장시험 결과에 기초하고, 대부분 높은 댐을 대상으로 하여 수행된 현장시험 및 계측 결과에 기초하기 때문에 국내 댐 적용성에 대한 검증이 필요한 실정이다. 그리고 이 경험식의 경우, 사력존의 경우 불포화대와 포화대, 코어존의 경우 상한값과 하한값 사이 심도별 산정되는 전단파속도의 차가 매우 크며, 특히, 코어존과 사력존으로 축조재료를 명확하게 구분하기 어려운 중소규모 흙댐(earth dam) 축조재료의 경우에는 그 적용이 곤란하다.

Vrymoed(1981)는 미국에 위치한 Oroville 댐의 동적해석에 필요한 축조재료의 입력물성을 평가하기 위하여, 계측지진기록을 활용하고 반복적인 수치해석을 수행함으로써 축조재료의 최대전단탄성계수(또는 전단파속도)를 산정하였다. 해당 연구에서는 댐 기초부와 댐 정상부에서 지진 시 계측된 가속도기록으로부터 댐의 동적물성과 직접적인 관계를 가지는 응답 특성인 고유진동수를 평가하였으며, 이것이 수치해석 결과로부터 도출되는 고유진동수와 동등한 결과를 타나낼 때 적용된 전단파속도 또는 최대전단탄성계수가 실제 댐 축조재료의 동적변형특성이라고 평가하였다. 변형계수의 추정 절차를 살펴보면, 수치해석적 방법에서 재료의 주요 변형특성인 최대전단탄성계수는 식 (2)로 가정하였고, 실제 지진계측결과로부터 산정된 고유진동수와 k<sub>2,max</sub>를 변경하며 반복적으로

Table 1. Velocity distribution formulae (Sawada & Takahashi, 1975)

Depth (m)	Zone	Rockfill (m/sec)		Core (m/sec)	
		Non-Saturated	Saturated	High	Low
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>			

수행한 동적해석에서의 고유진동수가 일치할 때의  $k_{2,max}$  를 찾음으로써 최대전단탄성계수를 산정할 수 있었다(Vrymoed, 1981).

$$G_{max} = k_{2,max} \cdot 1000 \cdot \sqrt{\sigma_m'} \quad (\text{단위: psf}) \quad (\text{Seed \& Idriss, 1970}) \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_m'$  은 평균유효구속응력으로 단위는 psf(lb/ft<sup>2</sup>)이다. 국내의 경우에는 그 동안 댐 부지에서 관측된 충분히 큰 지진기록이 부족하여 Vrymoed의 연구결과를 활용하기 어려웠으나, 최근 들어 미소지진기록을 활용하여 축조재료의 심도별 전단파속도를 추정하는 연구가 진행 중에 있다(Ha & Oh, 2009). 그러나 댐 지진계측기의 설치는 현재까지 다목적댐과 용수전용댐에 국한되어 있으며, 중소규모댐에는 상시 지진을 관측할 수 있는 지진계측기가 설치되어 있지 않아, 지진계측기가 설치되어 있지 않은 흙댐의 경우, 지진계측기 기록을 활용한 축조재료의 물성 추정은 불가능한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 지진계측기가 설치되어 있지 않은 중소규모 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 산정할 수 있는 대안으로, 인접발파에 따른 발파진동계측기 기록을 적극 활용하는 방법을 모색하였다. 본 연구의 목적은 발파진동실험으로부터 얻어진 계측기 기록을 분석하여 흙댐의 고유진동수를 산정하고, 계측된 가속도 기록으로 산정한 고유진동수와 기반암에서 계측된 발파파 가속도를 입력하중으로 한 반복적인 동적수치해석을 수행하여 계산한 고유진동수를 일치시키는 방법을 이용함으로써 흙댐 축조재료의 심도별 전단파속도를 추정하고 그 추정방법의 실효성을 확인하는 데 있다. 이를 위하여 국내 최초로 실제 운영 중인 흙댐에 대한 살대규모 근접 발파진동실험을 수행하였다.

발파진동의 다양한 특성에 따른 축조재료 물성 평가 결과의 일관성을 확인하기 위하여, 발파심도와 장약량을 변화시킨 4가지 발파유형의 인공 발파진동실험을 수행하고 계측자료를 분석하였다. 이와 같은 댐 축조재료의 물성 평가 결과는 발파유형별 상호 비교를 통하여 일관성을 확인하였고, 산정된 결과는 기존의 경험식에 의해 산정된 축조재료의 심도별 전단파속도 분포값과 비교하여, 그 실효성을 확인하였다.

## 2. 댐 발파진동실험 개요

본 연구에서 수행한 발파진동실험의 대상은 경상북도 청송군에 위치한 성덕댐이다. 대상댐은 제체의 최대높이가 19m인 중심코어형 댐으로 횡단면의 상단은 5m, 하부는 40m의 폭으로 축조되었으며 콘크리트 구조물로 조성된 월류부가 있다. 제체의 구성은 차수를 위한 중심 코어존과 댐체를 이루는 주 축조재료인 성토재료로

구분된 준형의 흙댐이다. 대상댐은 일부구간에 대하여 하류에 신설되는 성덕다목적댐 준공 후 철거 예정(2012년 말)에 있다. 본 연구에서는 이러한 이유로 성덕댐을 살대규모 발파진동실험을 위한 대상댐으로 선정하였다(Kim & Ha, 2012).

Figure 1은 발파진동실험을 위해 천공된 발파시추공의 수평위치와 발파진동을 계측한 기반암노두 및 댐 정상부의 가속도계 설치 위치를 나타낸 것이다. 대상댐의 댐축과 발파시추공 사이의 거리는 약 60m 이격되어 있다. 시추조사를 통하여 발파실험을 위한 시추공이 위치한 지반은 암반상태가 양호한 경암 지반임을 확인하였다.

직접적으로 발파가 수행된 발파시추공(Figure 1에서 Hole #1, #2, #3, #4)에서 발파진동을 측정하는 것이 이상적이나, 이는 계측기의 특성과 안전상의 이유를 고려할 때 불가능하다. 그러므로 이에 대한 대안으로 Figure 1에 나타난 바와 같이 발파시추공에 최대한 근접한 위치에서 발파진동을 측정하였다. 폭원의 계측위치는 측정된 자료를 2차원 동적해석을 위한 기반암에서의 입력파로 사용되기 때문에 수평적 위치뿐만 아니라, 굴착을 통해서 기반암 노두의 노출을 확인한 후, 그 위치에 계측용 가속도계를 설치하였다(Figure 2 참조). 댐 정상부에서의 응답을 계측하기 위한 가속도계는 Figure 3과 같이 설치하였다.

발파진동의 다양한 특성에 따른 물성 산정 결과의 일관성을 확인하기 위하여, 발파심도와 설치되는 장약량을 다르게 한 4가지 발파유형의 인공 발파진동실험을 수행하였다. 발파진동의 진폭, 방향성 등을 변화시켜 다른 진동유형에 대한 댐의 응답을 얻고자 하였다. Figure 4는 상세한 발파유형을 요약하여 나타낸 것이다.

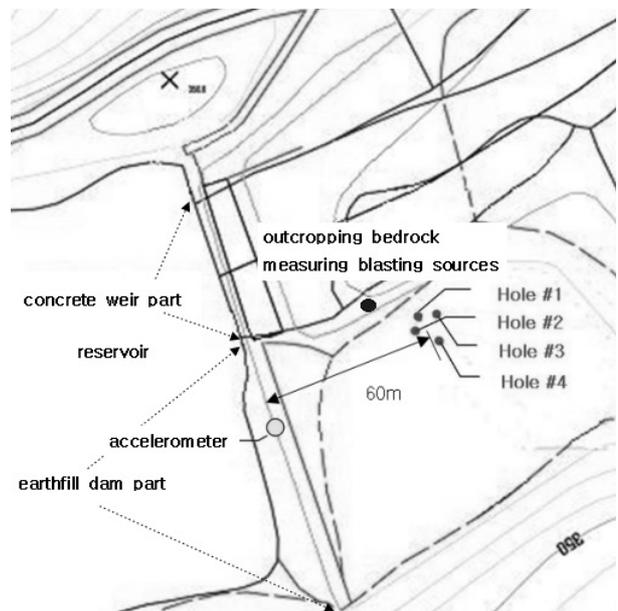


Fig. 1. Location of blasting bore holes and accelerometers



Fig. 2. Installation of accelerometer on the outcropping rock



Fig. 3. Installation of accelerometer on the crest of the dam

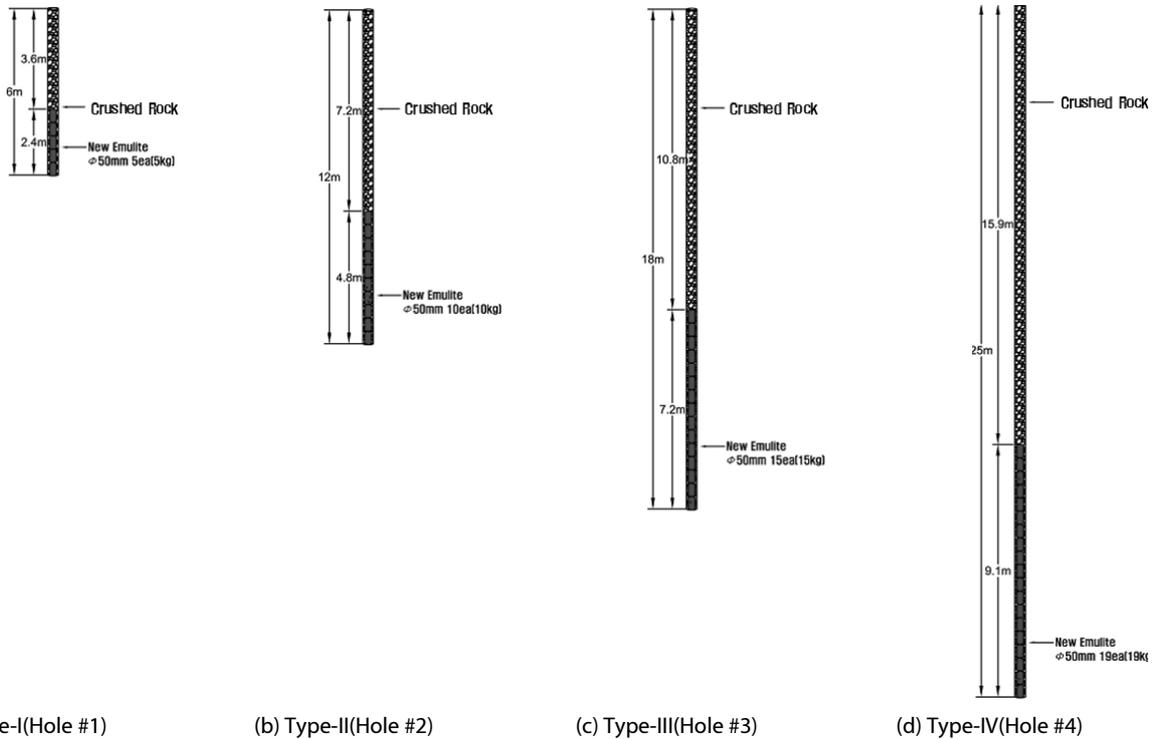


Fig. 4. Detailed blasting types of artificial blasting vibration tests

### 3. 발파진동실험 결과 및 분석

#### 3.1 발파진동실험 계측 결과

Figure 5는 각각의 발파유형에 따른 실험으로부터 기반암노두 (Figure 1에 폭원 계측위치로 표시됨)와 댐 정상부에서 계측된 진동의 가속도 시간이력을 나타낸 것이다. 기반암노두와 댐 정상부에서 계측된 가속도의 최대값은 각각 0.10g~0.44g, 0.06g~0.08g 범위를 나타냈으며, 발파유형별로 다양한 값을 보였다.

Figure 6은 발파유형별 기반암노두에 설치된 가속도계로 계측한 가속도 시간이력의 주파수특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수

있듯이, 발파진동의 지배주파수는 거의 모든 유형에서 약 46Hz로 거의 같고 전반적인 푸리에진폭 곡선의 형태는 유사하게 나타났다. 다만, Type-II의 발파진동 가속도는 상대적으로 저주파에서 고주파까지 고른 주파수 분포를 나타내고 있다. 푸리에진폭 곡선의 형태가 상호간에 유사한 것은, 발파공이 위치한 지반의 층후가 지표부터 시추공 바닥까지 거의 일정하게 경암의 분포 특성을 나타내고 암반의 상태 또한 매우 양호한 상태이므로, 심도 및 장약량에 의한 발파유형 변화가 정상부 가속도에 대하여 진폭에만 영향을 크게 미쳤기 때문인 것으로 판단된다.

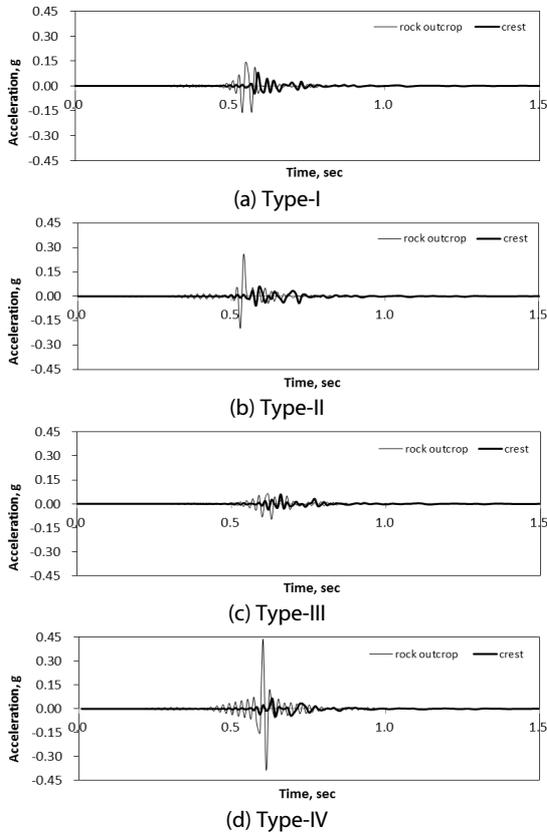


Fig. 5. Acceleration time histories observed on outcropping rock and dam crest

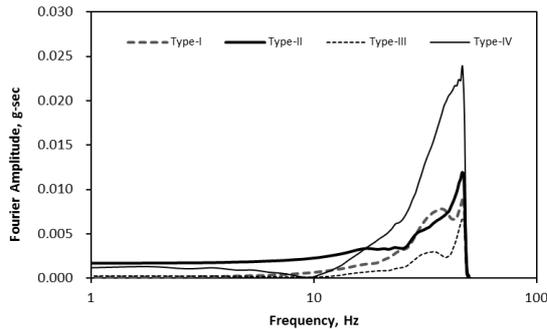


Fig. 6. Frequency characteristics of acceleration time history observed on outcropping rock with various blasting types

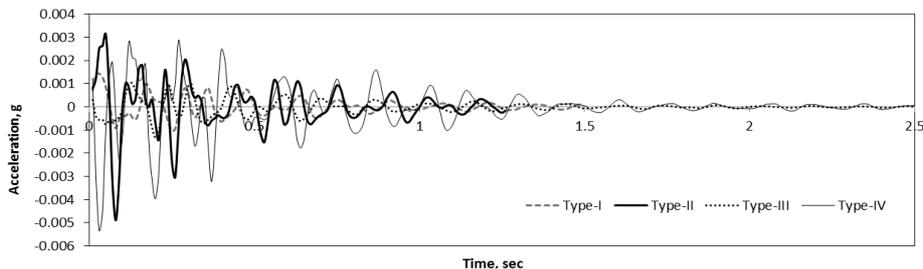


Fig. 7. Acceleration time histories at the crest of the dam with blasting types during free vibration only

### 3.2 계측기록을 이용한 댐 고유진동수 산정

본 연구에서 발파 위치는 댐 정상부에 전달되는 가속도의 진폭을 최대화함으로써 댐의 응답 산정을 용이하게 하기 위하여, 댐으로부터 불과 60m 이격된 근거리 지점으로 선정, 실험을 수행하였다. 그러나 근거리 발파로부터 소정 진폭의 가속도 기록을 얻을 수 있다 하더라도, 계측된 전체 기록은 지진동의 주파수 특성과는 상이한 고주파수대역의 에너지를 포함하는 발파진동 특유의 주파수특성을 나타내므로 전체 기록을 분석할 경우 댐 고유의 진동응답 특성을 명확히 구분하여 파악하기는 어렵다. 단, 인위적으로 유발시킨 진동원으로서의 발파진동은 댐의 동적 응답 거동을 야기하기 위한 충분히 큰 에너지를 제공하므로, 계측 데이터에서 발파진동 자체특성을 배제할 경우 댐의 고유응답특성 평가에 필요한 신호만을 선별적으로 분석할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 댐에서 계측된 전체 기록 중 주진동, 즉 발파진동특성에 의한 최대 진폭 신호 이후에 계측되는 자유진동 감소부분의 기록만을 분석하는 방법을 적용함으로써 댐의 진동특성과 상이한 발파진동의 주파수 특성영향을 줄이고자 하였다. 즉, 발파진동실험으로 계측된 댐 정상부의 가속도 기록 중, 발파진동 자체특성이 지배적으로 나타나는 초기 주진동 이후 댐의 동적응답특성이 지배적으로 나타나는 후반부 자유진동감쇠 가속도 시간이력만을 대상으로 주파수분석을 수행함으로써, 대상댐의 고유진동수를 산정하였다.

자유진동감쇠 가속도 시간이력 구간에 대한 주파수 분석을 이용한 고유진동수 산정방법을 댐 정상부에서의 응답가속도의 진폭이 작은 미소지진을 이용하여 적용하는 경우에는, 주진동의 진폭과 자유진동의 진폭크기 차가 거의 없어서 자유진동 감소구간을 객관적이고 정량적인 기준으로 발췌하는 것이 어렵다. 그러므로 이러한 자유진동 감소곡선을 이용하는 방법은 계측되는 지진가속도의 진폭이 충분히 커서 주진동과 자유진동부분을 잡음을 감안하더라도 확연히 구분할 수 있는 경우에 적용이 가능하다(Kim & Ha, 2012).

Figure 7은 댐 정상부에서 계측된 발파유형별 가속도 계측기록 중 자유진동 감쇠를 나타내는 후반부 가속도 시간이력만을 발췌하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 발췌된 가속도기록의 자유진동 감쇠 부분만을 이용한 데이터에 대하여 푸리에변환을 수행함으로써

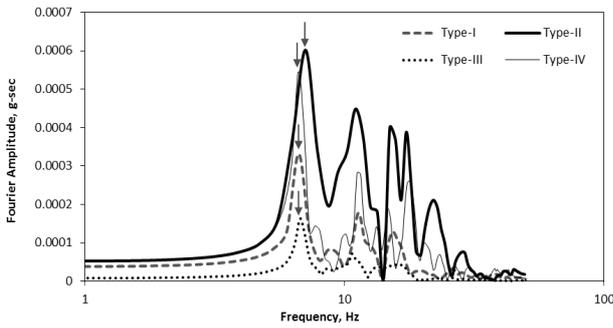


Fig. 8. Evaluation of fundamental frequencies of the target dam with blasting types using observed blasting records

발파유형별 고유진동수를 산정하였다. 또한, 이후 지진응답해석을 위한 입력값으로 활용하기 위하여, 발체된 가속도 기록의 자유진동 감쇠 시간이력에 자유진동 감쇠법(logarithmic decrement)(Kramer, 1996)을 적용하여 감쇠비를 산정하였다. 고유진동수를 측정할 댐 상하류방향의 운동을 1차 모드(고유진동모드)의 운동으로 간주하고, 1자유도(single degree of freedom) 시스템을 가정하여 감쇠기록 중 잇따른 두 개의 진폭의 자연로그비의 평균값을 계산하여 각 발파유형별 감쇠비를 산정하였다. 산정된 감쇠비는 각 발파유형별로 거의 동일하였으며, 그 평균값은 0.052로 나타났다.

Figure 8은 자유진동 감쇠 가속도 시간이력에 대한 푸리에변환으로부터 대상댐의 고유진동수를 산정한 결과를 나타낸 것으로 발파 유형별(Type-I, Type-II, Type-III, Type-IV)에 따른 각각의 고유진동수는 6.67Hz, 7.00Hz, 6.74Hz, 6.64Hz로 나타났다. 즉, 각 계측기록에 대하여 자유진동감쇠부분을 발체하여 고유진동수를 산정하는 방법으로 구한 대상댐의 고유주기는 발파유형에 크게 영향을 받지 않으며, 약 6.67Hz의 일정한 진동수로 산정될 수 있었다.

#### 4. 댐 축조재료의 심도별 전단파속도 역산

##### 4.1 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.

Figure 9는 Ambraseys(1960)의 연구결과 이후, Mejia & 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

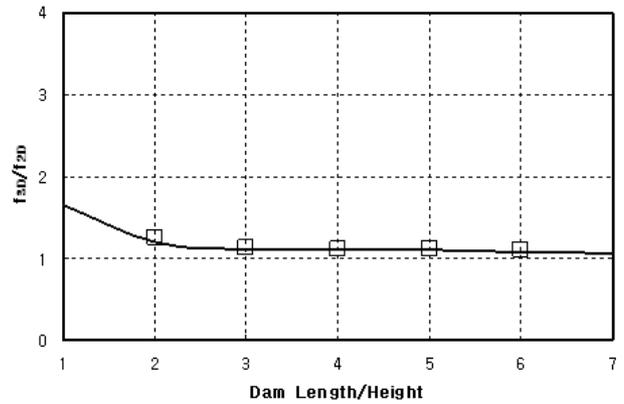


Fig. 9. Comparison between fundamental frequencies from 2-D and 3-D analyses of dams in rectangular canyons

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 10% 정도 더 크게 평가되었음을 알 수 있다. 이러한 효과는 앞서 언급된 계곡효과에 의한 영향이라고 할 수 있다(Ha & Oh, 2008). 참고로 본 연구의 대상댐인 성덕댐의 최대높이는 19m이고, 월류부를 제외한 사력부의 댐 길이가 72m로 길이/높이 비는 3을 초과한다.

##### 4.2 댐 2차원 동적응답해석 개요

본 연구에서 진동원이 점원(point source)으로 주어지는 3차원 발파진동해석 문제를 2차원 평면변형 문제로 해석하는 데에는 하중 측면에서 다소 문제가 따를 수 있다. 점원에 의해서 구조물의 축 직각방향에서 도달되는 진동파를 선원(line source)과 같은 평면파로 근사하기 위한 Dowding(2000)의 가정, 즉, 구조물의 축 중심에 도달하는 파와 양 단에 도달하는 파에 의한 입자운동의 벡터 크기 간의 차가 5% 이내이면 점원을 평면파로 가정하는 조건(Dowding, 2000)을 적용한다면, 본 연구의 경우 폭원의 위치는 최소 120m 이상이 되어야 한다(본 연구의 경우, 60m). 그러나 이러한 원거리 발파에서는 인위적인 대발파가 아니면 댐 정상부에서 충분한 진폭을 갖는 응답파를 얻는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 본 연구에서의 2차원 동적응답해석의 경우 발파원에 대한 댐체의 응답변위와 증폭특성을 정확하게 산정하는 데에는 한계가 있다. 다만, 발파원이 위치한 지반과 댐 기초가 연암으로 동일하고 균질한 매질이라는 사실과 댐의 주파수응답 특성만을 공학적으로 분석하고자 하는 연구목표 측면에서, 점원에 의한 진동파를 평면파로 가정하는 것도 그 실효성이 충분히 있는 것으로 판단하여 2차원 동적해석을 수행하였다.

본 연구에서 2차원 동적응답해석은 필댐의 동적해석에 국내외에서

가장 널리 사용되고 있는 지반해석 프로그램인 FLAC2D(Version 5.0)(Itasca Consulting Group, 2005)를 사용하였다. FLAC2D는 시간영역에서 동적문제의 해를 구하는 유한차분해석 프로그램으로서, 매 분할 해석시간(timestep)에 모든 절점(node)에서 운동방정식의 해를 구한다.

경계조건은 해석경계면에서 비반사(non-reflecting) 특성을 가질 수 있도록 자유장운동을 강제하는 자유장경계조건(free-field boundary condition)을 적용하였다(Figure 10 참조). Figure 10에서 보는 바와 같이 해석영역의 측면경계는 흡수경계를 모사할 수 있도록 자유장 해석절점들과 점성댐퍼(viscous dashpots)로 연결되어 있다.

동적해석을 위한 입력하중은 각 발파유형에 따른 기반암노두에서 계측된 가속도 시간이력(Figure 5 참조)이 댐 바닥에 가해질 수 있도록, 각 발파유형에 대하여 deconvolution된 가속도시간이력을 해석영역 바닥에 입력하였다(Figure 11 참조).

Figure 11은 정적해석과 동적해석을 위한 성덕댐의 해석요소망, 입력하중 작용위치, 정상부응답 기록 위치를 나타낸 것이다. 지반해석 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. Mohr-Coulomb 지반모델을 사용한 이유는 반복적인 수치해석에 의한 최대전단탄

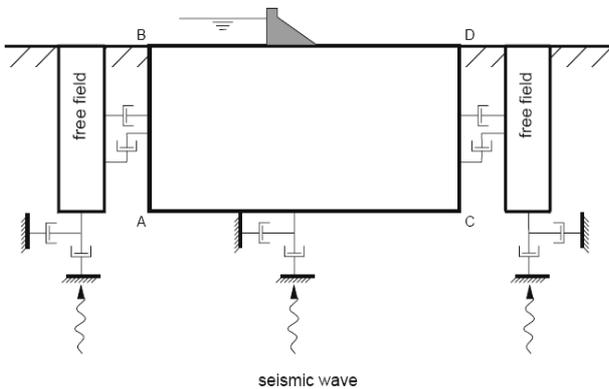


Fig. 10. Free field boundary condition for seismic analysis (Itasca Consulting Group, 2005)

성계수의 역산의 용이성과 함께 실제 댐체에 발생할 수 있는 전단변형율의 수준이 탄성범위내의 값일 것으로 예상하였기 때문이다. 계측기록만으로 발파진동에 의해 댐체에 발생된 최대 전단변형율을 근사적으로 추정해 보기 위하여, 발파진동 각 유형별로 나타난 댐 정상부에서의 가속도 계측기록(Figure 5 참조)을 적분하여 계략적으로 정상부에서의 최대 수평변위를 산정해 보았다. 산정한 정상부에서의 최대 수평변위는 0.003cm이고, 최대단면의 댐 높이가 19m이므로 전단변형율은  $1.58 \times 10^{-4} \%$  ( $0.00003 / 19 = 1.58 \times 10^{-6}$ )로 추정해 볼 수 있다. 이러한 전단변형율은 미소하며, 발파하중의 지속시간이 통상적인 지진파와 달리 매우 짧기 때문에 하중 지속시간동안 댐체의 거동은 탄성거동을 가정할 수 있다.

정적해석을 위한 입력물성 중 코어재료와 성토재료의 내부마찰각, 점착력, 단위중량은 축조재료에 대한 시험 성과자료(KRCC, 1983)를 이용하였다. 코어재료와 성토재료의 전단탄성계수와 체적탄성계수는 현장에서 시행된 표준관입시험결과로 얻어진 평균  $N_{값}$ (코어재료 13, 성토재료 22)에 대하여 문헌에 의한 경험식,  $E_s (kN/m^2) = 766 N$ (Schmertmann, 1970)을 적용하여 탄성계수,  $E$ 를 산정하였고, 포아송비는 0.3을 가정하여 해석을 수행하였다.

기반암에 대한 정적물성은 주로 지반조사 결과를 바탕으로 경험식에 의한 산정방법으로 결정하였다. 단위중량의 경우, 지반조사 결과 경암층이며 응회암으로 구성되어 있고, 암질지수(RQD)는 90%로서, 암질상태가 양호하여 응회암의 일반적인 단위중량을 적용하였다(Yune & Park, 2008). 마찬가지로 점착력과 마찰각도 RMR(Rock Mass Rating)분류법에 의해 양호이상 등급의 암반으로 판단되어 이에 해당하는 문헌값을 적용하였다(Yune & Park, 2008). 기반암의 전단탄성계수와 체적탄성계수의 경우 경암의 전단파속도가 일반적으로 1,500m/sec를 초과하므로(KGS, 2006), 전단파속도를 1,500m/sec로 정하고, 여기에 밀도값을 이용한 식 (1)을 적용하여 최대전단탄성계수로 가정하였으며, 포아송비는 0.2를 가정하여 체적탄성계수를 결정하였다.

Table 2는 이러한 절차에 의해 선정된 성덕댐의 각 존별 정적입력 물성을 나타낸 것이다.

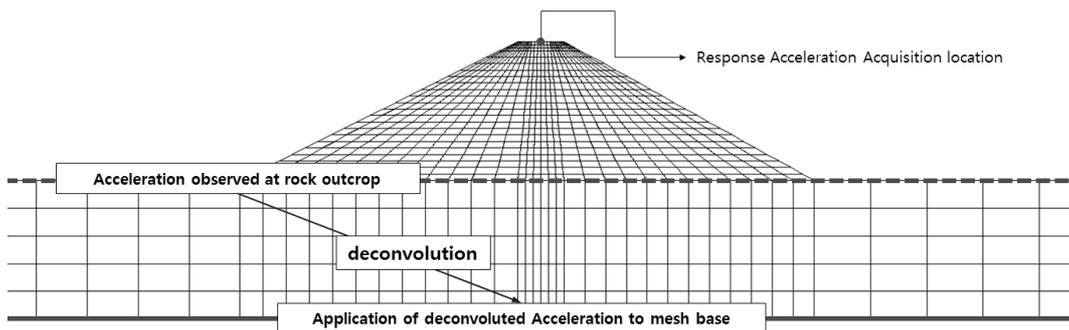


Fig. 11. 2-D finite element mesh and location of input seismic load and response measurement of Seongduk dam

Table 2. Input parameters for static analysis of Seongduk dam

Material	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Bulk modulus (MN/m <sup>2</sup> )	Shear modulus (MN/m <sup>2</sup> )	Friction angle (°)	Cohesion (MN/m <sup>2</sup> )
Core	19.41	8.30	3.83	9	0.1
Embankment	19.85	14.00	6.48	17	0.06
Bedrock	22.00	6728	5046	40	3.5

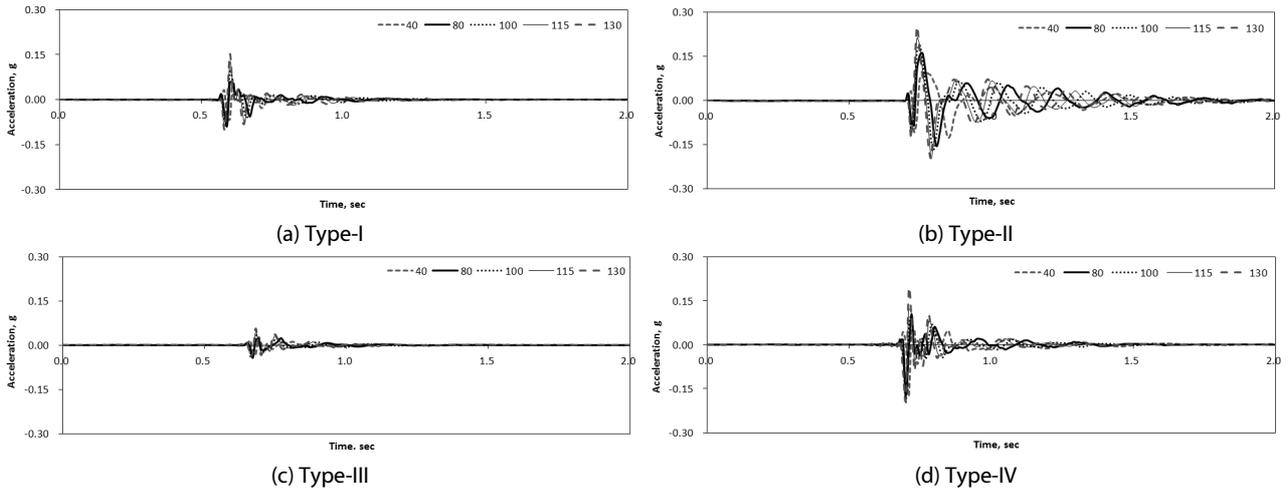


Fig. 12. Computed acceleration response at dam crest with various  $k_{2,max}$

동적해석을 위한 입력물성으로는 기반암의 경우 Table 2의 정적 해석 입력물성을, 코어의 경우 댐 부피의 7% 이내로서 전단탄성계수는 경험적인 Sawada & Takahashi(1975)의 코어존의 깊이별 전단파속도 분포식(Table 1 참조)의 댐 높이 평균값에 코어존의 밀도를 곱하여 최대전단탄성계수를 정하고 포아송비는 0.3을 적용하여 체적탄성계수를 일직값으로 입력하였다. 역산을 하게 될 성토존의 경우, 최대전단탄성계수는 식 (2)로 표현될 수 있는데, 본 연구에서는  $k_{2,max}$ 를 여러 가지로 변화시킨 값(40, 80, 100, 105, 130)을 사용하였으며, 체적탄성계수는 산정된 전단탄성계수에 포아송비 0.3을 적용하여 산정하였다.

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

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3)$$

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 식 (4)로

표시된다(Chopra, 1995; Itasca Consulting Group, 2005).

$$\alpha = \xi_{min} 2\pi f_{min}, \quad \beta = \frac{\xi_{min}}{2\pi f_{min}} \quad (4)$$

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

본 해석에서는 최소 감쇠비,  $\xi_{min}$ 은 고유진동모드에서의 감쇠비, 즉 3.2절에서 고유진동수를 산정한 댐 정상부에서의 자유진동감쇠 시간간격에 자유진동 감쇠법을 적용하여 산정한 0.052를 적용하였다. 최소 고유진동수,  $f_{min}$ 은 마찬가지로 3.2절에서 산정한 고유진동수, 6.67Hz를 적용하였다. 이렇게 산정된  $\xi_{min}$ 과  $f_{min}$  값을 식 (4)에 대입하여 Rayleigh 상수  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 각각 결정하였다.

### 4.3 댐 2차원 동적응답해석 결과 및 성토존 전단파속도 추정

3.2절에서 제시한 바와 같이 성토댐의 고유진동수는 6.67Hz이고, 각 발파유형에 따른 기반암노두에서 계측된 가속도 시간간격을 입력하중으로 하고, 각 발파유형에 대하여  $k_{2,max}$ 를 40, 80, 100, 115, 130으로 변화시킨 반복적 2차원 동적 수치해석을 수행하였다.

Figure 12는 해석결과로부터 계산된 각 발파유형별 성토재료 강성에 따른 댐 정상부 응답 가속도 시간간격을 나타낸 것이다. 전반적으로 모든 발파유형에서  $k_{2,max}$ 가 커질수록 정상부에서의

최대가속도는 증가하며, 이러한 증가 경향은 폭원 근접 위치(기반암 노두)에서의 입력과의 진폭이 커질수록 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 13은 해석결과로부터 계산된 각 발파유형별 댐 정상 부 응답가속도 기록 중 자유진동 감쇠를 나타내는 후반부 가속도 시간이력만을 발췌하여 나타낸 것이다. 발췌된 가속도기록의 자유

진동 감쇠 부분에 대한 푸리에변환으로부터 유형별 상이한 성토재료 강성에 따른 고유진동수를 각각 구하였다.

Figure 14는 이러한 절차로부터 고유진동수를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 대상댐에서 계측기록으로 산정된 성토댐의 고유진동수는 6.67Hz이고, 이 값은 앞서 설명한 3차원 계곡효과가 고려된

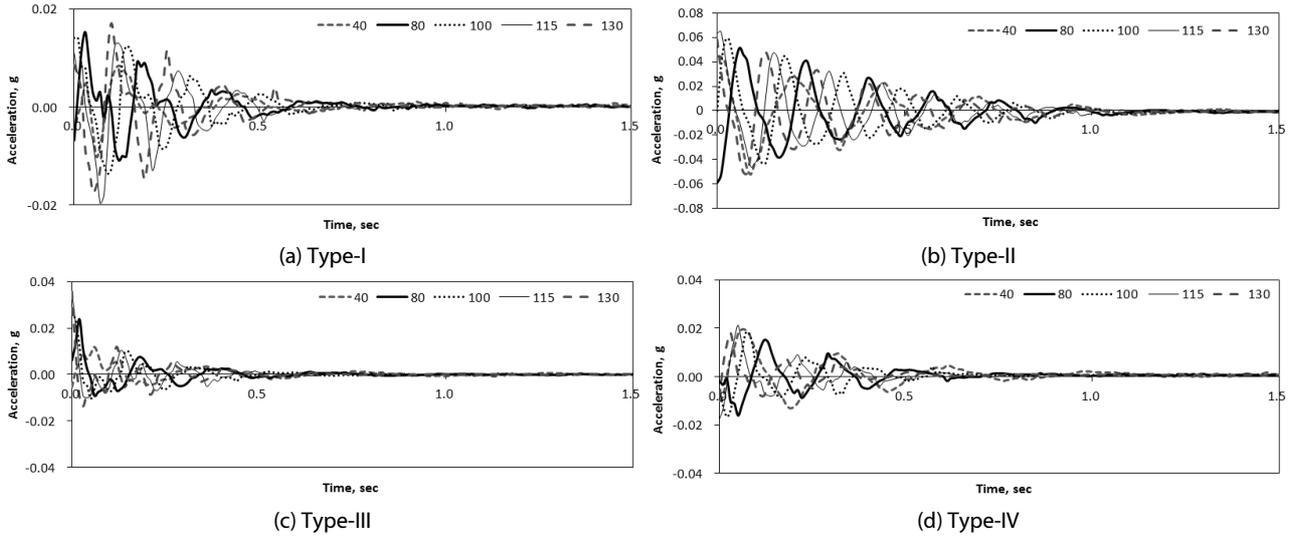


Fig. 13. Computed free vibration acceleration time histories at dam crest with various  $k_{2,max}$

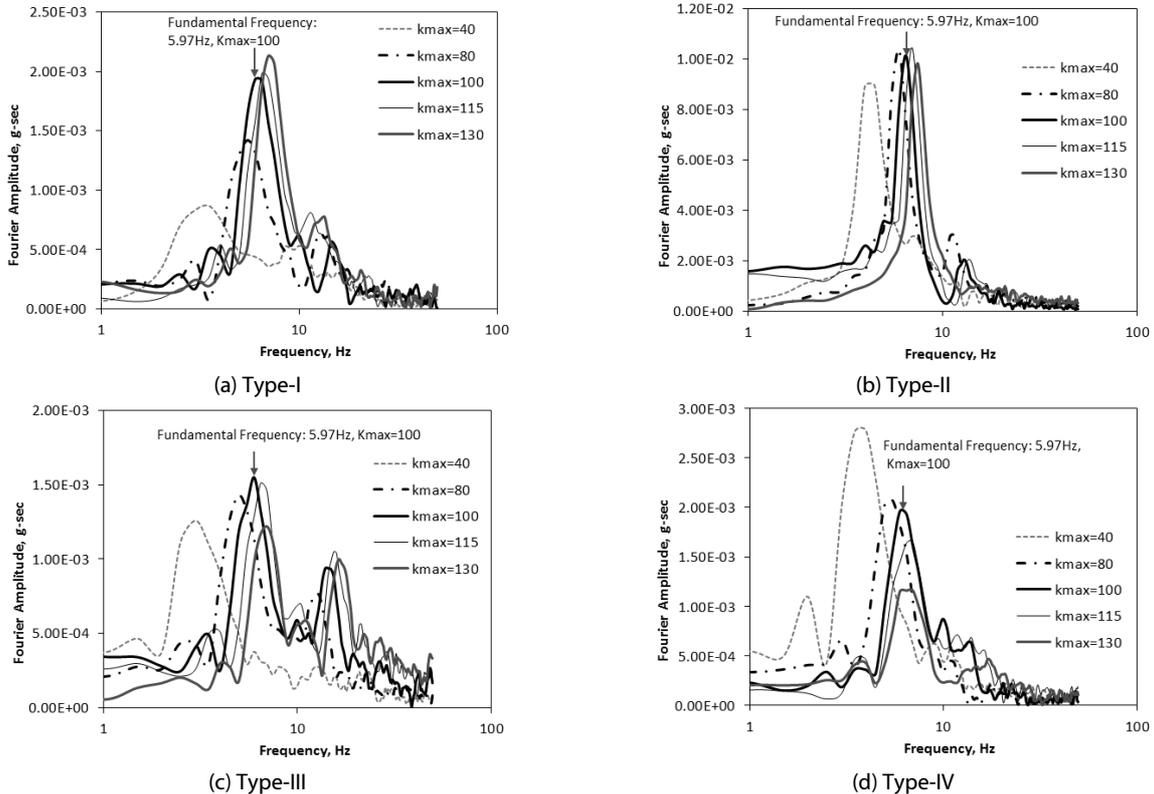


Fig. 14. Fourier amplitude curves for computed free vibration acceleration time histories with various  $k_{2,max}$

실제 댐에서의 고유진동수이므로 2차원 동적해석의 경우에는 이 값보다 약 10% 작은 값을 나타내는 고유진동수를 가지게 될 때의 전단탄성계수  $G_{max}$  를 선정하여야 한다(Vrymoed, 1981).

Figure 14의 해석 결과에서 알 수 있듯이, 모든 발파유형에 대하여  $k_{2,max}=100$ 일 때 고유진동수는 5.97Hz로서 계측된 발파진동기록 분석으로부터 산정된 고유진동수 6.67Hz의 약 10% 작은 값에 해당되는 것으로 나타났다. 즉, 다양한 발파진동에 대하여도 성토재료의 강성을 나타내는  $k_{2,max}=100$ 인 경우가 일관성 있게 3차원 계곡효과를 반영한 댐의 고유진동수와 2차원 동적해석에 의한 고유진동수와의 적합성을 만족시킴을 확인할 수 있었다. 그러므로  $k_{2,max}=100$ 인 경우가 성터댐 성토재료의 동적물성을 대표하는 값이라 판단할 수 있다.

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

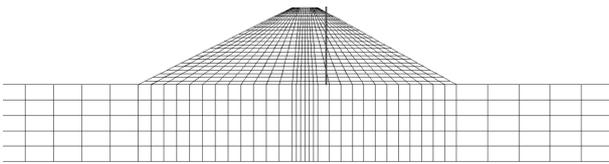


Fig. 15. Location where shear moduli were extracted

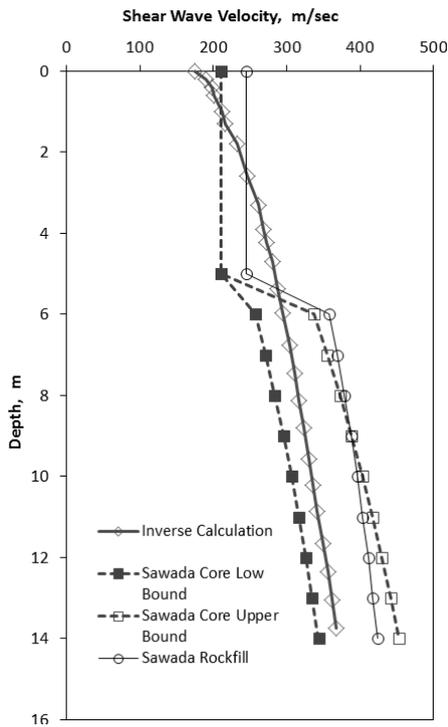


Fig. 16. Comparison between shear wave velocity profile estimated by back calculation and that by the empirical method

$k_{2,max}=100$ 인 경우, 심도별 성토재료 전단탄성계수를 Figure 15와 같이 추출하여 깊이별 전단파속도로 환산하였다. Figure 15와 같이 물성추출 방향(댐 사면에서 연직하향 방향)을 정한 이유는 기존의 경험식(Sawada & Takahashi)과 비교하기 위하여 경험식에서 물성을 추출한 방향과 일치시키기 위한 것이다.

Figure 16은 역산한 결과를 기존의 Sawada & Takahashi의 경험식에 의해 산정된 결과와 함께 도시한 것이다. 비교 결과, 역산된 성토존의 깊이별 전단파속도 분포는 Sawada & Takahashi가 제안한 코어존의 상한값과 하한값의 평균값 정도를 나타내었다. 시굴(test pit)로부터 채취한 성토재료에 대한 입도분포시험 결과, 성토재료는 200번 체 통과율이 2.15%로 50%이하이며, 모래의 백분율(직경 4.75mm~0.075mm)은 69%, 균등계수와 곡률계수는 각각 6.2와 1.25로써, 통일분류법에 의하여 SW(Well-graded Sand)로 분류되었다. 그러므로 성토존의 심도별 전단파속도 결과는 기존 경험식에서 제시된 큰 입자를 포함하거나, 대부분의 입자 크기가 큰 사력존보다는 코어존의 전단파속도 특성을 보임이 타당한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 역산결과의 실효성을 보여주는 것뿐만 아니라, 역산방법이 흙댐의 성토재료와 같이 대상 축조재료를 코어재료나 사력재료로 명확히 구분하기 어려운 경우, 기존 경험적 방법의 적용상의 한계성을 극복할 수 있는 대안으로 제시될 수 있음을 보여준다.

이상의 결과로부터 지진계가 설치되지 않아 실시된 계측기록을 이용할 수 없는 중소규모 흙댐의 경우, 인접발파에 따른 발파진동계측기록에 대한 분석으로도 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 산정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 지진계측기가 설치되어 있지 않은 중소규모 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 산정할 수 있는 대안으로, 인접발파에 따른 발파진동계측기록을 적극 활용하는 방법을 모색하였다. 이를 위하여 국내 최초로 실제 운영 중인 흙댐에 대한 실험대규모 근접 발파진동실험을 수행하고, 발파실험 동안 폭원에 인접한 기반암노두와 댐 정상부에서 계측한 응답가속도 기록을 분석하여 흙댐 축조재료의 심도별 전단파속도를 추정하였다. 다양한 발파진동 특성에 따른 축조재료에 대한 물성산정 결과의 일관성을 확인하기 위하여, 발파심도와 장약량을 변화시킨 4가지 발파유형의 인공 발파진동실험을 수행하였다. 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 발파진동실험으로부터 얻어진 계측기록을 분석하여 흙댐의 고유진동수를 산정하고, 계측된 가속도기록으로 산정한 고유

진동수와 기반암노두에서 계측된 발파파 가속도를 입력하중으로 한 반복적인 수치해석을 수행하여 계산한 고유진동수를 일치시키는 방법으로, 댐 축조재료의 심도별 전단파속도를 추정하는 방법을 적용하였다. 이러한 방법으로 산정한 대상댐 성토재료의 전단파속도는 발파유형에 크게 영향을 받지 않고 일관성 있는 값을 산정하는 것으로 나타나, 발파진동실험에 의한 흙댐 축조재료의 전단파속도 산정방법이 일관된 결과를 줄 수 있음을 확인하였다.

- (2) 본 연구에서 산정한 대상댐 성토재료 전단파속도 산정결과를 국내에서 가장 널리 사용하고 있는 Sawada & Takahashi의 경험식에 의해 산정된 결과와 비교한 결과, 산정된 성토층의 전단파속도는 경험식에서 제안한 코어층의 상한값과 하한값의 평균값 정도를 나타내어 그 실효성을 확인할 수 있었다. 아울러 이러한 결과는 역산방법이 흙댐의 성토재료와 같이 대상 축조 재료를 코어재료나 사력재료로 명확히 구분하기 어려운 경우, 기존 경험적 방법의 적용상의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 제시될 수 있음을 보여주었다.
- (3) 이상의 결과로부터 지진계가 설치되지 않아 실지진 계측기록을 이용할 수 없는 중소규모 흙댐의 경우, 인접발파에 따른 발파진동계측기록에 대한 분석으로도 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 산정할 수 있음을 확인하였다.

본 연구결과는 실지진 계측기록을 확보할 수 없거나 현장탐사를 수행하지 않은 중소규모 흙댐의 전단파속도를 산정하기 위하여, 인위적으로 발파진동실험을 수행해야 함을 제안하는 것이 아니라, 댐 주변에 인접발파 공정이나 계획이 있을 경우, 발생하는 인공진동을 효과적으로 활용할 수 있다면 실효성 있게 대상댐 축조재료의 전단파속도를 산정할 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

### 감사의 글

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

### 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 applica-

tion of earthquake engineering, Prentice-Hall, Inc., pp. 416-421.  
 Dowding, C.H. (2000) Construction vibration, 2<sup>nd</sup> Edition, ISBN 0-9644313-1-9, USA, pp. 7-18.  
 Ha, I.S. and Oh, B.H. (2008) Inverse calculation of shear wave velocity of rockfill zone using microearthquake records, *Proc. of Korea Society of Civil Engineers*, KSCE, pp. 3051-3054.  
 Ha, I.S. and Oh, B.H. (2009) Inverse calculation of shear wave velocity of rockfill zone using microearthquake records, *Proc. of 29th USSD Annual Meeting and Conference*, US Society on Large Dams, Nashville, Tennessee, pp. 465-472.  
 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 (2005) FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, April, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.  
 Kim, N.R. and Ha, I.S. (2012) Evaluation of fundamental period of rockfill dam using blasting vibration test. *J. of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.32, No.5C, pp. 185-192 (in Korean).  
 Korean Geotechnical Society(KGS) (2006) Seismic design for earth structures, Series No.8, Goomibooks, pp. 51-197 (in Korean).  
 Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(MLTM) (2011) Dam design criterion, MLTM, pp. 223-224 (in Korean).  
 Korea Rural Community Corporation(KRCC) (1983) Design documents for irrigation project of Seongduk province, Korea Rural Community Corporation (in Korean).  
 Makdisi, F.I. (1976) Performance and analysis of earth dams during strong earthquake, thesis presented of the University of California at Berkeley.  
 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.  
 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 (in Japanese).  
 Schmertmann, J.H. (1970) Static cone to compute settlement over sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM3, pp. 1011-1043.  
 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.  
 Vrymoed, J. (1981) Dynamic FEM model of Oroville dam, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.107, No. 8, pp. 1057-1077.  
 Yune, J.S. and Park, J.K. (2008) Rock engineering for civil engineers, Goomibooks, pp. 70 (in Korean).