청천댐 주변의 천부 P파 및 S파 속도구조

박영환 · 김기영 *

강원대학교 지구물리학과

Near-surface P- and S-wave Velocity Structures in the Vicinity of the Cheongcheon Dam

Yeong Hwan Park and Ki Young Kim*

Department of Geophysics, Kangwon National University

요 약: 높이 23 m인 보령시 청천댐 상부와 인근에서 5 kg 해머를 이용하여 소규모 굴절법 및 표면파 탐사를 실시하였다. 인공 지진파의 수직 및 수평성분을 초동주시 토모그래피 및 레일리파 분산곡선 역산을 통하여 천부 P파속도(v_p)와 S파속도(v_s) 구조를 파악하였다. 중생대 퇴적암질 기반암의 평균 v_p 와 v_s 는 댐마루 30 m 깊이에서 각각 1650 m/s와 950 m/s, 하류쪽 댐체 끝 지점 10 m 깊이에서 각각 1650 m/s와 940 m/s로 분석된다. 이 층들의 동포아송비는 0.24~0.25의 범위로, 고화된 퇴적층의 값과 일치한다. 댐체로부터 152 m 하류지점의 깊이 45 m 시추공 부근에서의 SH파 굴절법 토모그램은 10~12 m 깊이에 평균 v_s 가 870 m/s인 임계굴절면이 존재함을 보여준다. 이 지역에서는 덮개층의 v_p 와 v_s 가 각각 500 m/s와 200 m/s인 상부층과 깊이에 따라 속도가 거의 선형으로 증가하는 하부층으로 구성되어 있다.

주요어: 청천댐, 주시 토모그래피, 표면파 분산, 동포아송비

Abstract: On and near the 23-m high earthen Cheongcheon dam in Boryeong City, Korea, short seismic refraction and surface-wave profiles were conducted using a 5-kg sledgehammer. From vertical and horizontal components of the seismic waves, near-surface P-wave velocities (v_p) and S-wave velocities (v_s) were derived by inverting first-arrival refraction times and dispersion curves of Rayleigh waves. Average v_p and v_s for the Jurassic sedimentary basement were determined to be 1650 and 950 m/s at a depth of 30 m directly beneath the dam and 1650 m/s and 940 m/s at a depth of 10 m at the toe of the dam, respectively. The dynamic Poisson's ratio for these strata were therefore in the range of 0.24 to 0.25, which is consistent with ratios for consolidated sedimentary strata. Near a 45-m borehole 152 m downstream from the dam crest, an SH tomogram indicates a refraction boundary with an average v_s of 870 m/s at depths of 10~12 m. At this site, the overburden comprises the upper layer with relatively constant v_p and v_s around 500 and 200 m/s, respectively, and the lower layer in which both v_p and v_s increase with depth almost linearly. The dynamic Poisson's ratios for the overburden were in the range of 0.30 to 0.43.

Keywords: Cheongcheon dam, travel-time tomography, surface-wave dispersion, dynamic Poisson's ratio

서 론

댐체 및 그 주변에서 행해지는 지구물리학적 조사는 주로 댐체의 누수부위 탐지 및 지진동에 대한 안정성 평가를 목적으로 사용되고 있다. 국내에서는 댐체의 누수현상을 탐지하기 위해서 주로 전기비저항 탐사가 사용되어 왔으나(Jung *et al.*,

1992; Lee *et al.*, 2000; Song *et al.*, 2000, 2001; Park *et al.*, 2002), 이 방법은 함수비가 높은 중심점토에 의한 저비저항대가 형성되어 있는 댐체 중심부의 누수 여부를 판정하기 어려운 문제가 있다(Park *et al.*, 2005). 이를 극복하기 위하여 최근에는 시추공간 전기비저항 토모그래피(crosshole resistivity tomography)가 널리 이용되고 있으며(Yi *et al.*, 2003), 시추공 케이싱에 의한 영향과 비용문제 극복을 위하여 지표면 교차측선 전기비저항 토모그래피(crossline resistivity tomography)를 적용하기도 한다(Cho *et al.*, 2007).

댐체에서의 탄성과 탐사 방법은 굴절과 초동주시 토모그래피와 표면파 분산곡선 역산을 이용한 댐체의 누수부위 탐지(Kim *et al.*, 2011)와 지진발생 시 댐의 거동을 근사적으로 예측하기 위한 댐의 고유주기 산정(Ha, 2011) 등에 사용되고 있다. 굴절된 P파와 표면파 분산곡선 역산으로 구한 S파의 속도

2013년 1월 14일 접수; 2013년 6월 8일 수정; 2013년 6월 12일 채택

*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University, Hyoja-2-dong, Chuncheon, Kangwon-do

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fig. 1. Aerial photograph of the Cheongcheon dam in Boryeong City, Korea showing locations of seismic profiles (solid lines) and broadband seismic stations (solid circles) on the dam crest (C), 55 m downstream at the toe of the dam (T), and 152 m downstream from the dam crest at the bottom of a 45 m deep borehole (B). Locations of three boreholes (BH-1, BH-2, and BH-3) are also indicated. The inset map shows the study area in the Korean peninsula.

를 이용하여 비파괴적으로 구하는 동포아송비는 암석의 특성 변화에 따라 매우 민감하게 반응하기 때문에(Nations, 1974; Miller and Stewart, 1990) 누수부위 탐지에 효과적인 지표로 사용될 수 있다. 또한 댐체의 고유주기는 지진 계측자료 분석에 의한 방법, 강제 진동 실험에 의한 방법, 상시미동 측정에 의한 방법 등에 의해 산출할 수 있다(Ohmachi *et al.*, 1994).

이 연구의 목적은 충남 보령시에 있는 청천댐을 대상으로 지진 등에 의해 댐체 및 그 주변에 가해지는 지진동 증폭 정도를 파악하는 데 필수적인 댐체 및 하부 지층의 속도 분포를 산출함에 있다(Fig. 1). 이를 위해 댐마루, 댐기초, 하류의 시추공 지진계 설치 지점 부근에서 SH파 및 P파 굴절법과 표면파 분산곡선 역산을 이용하여 천부 지층속도 구조를 파악하였다.

배경이론

초동주시 토모그래피

초동주시 토모그래피는 Radon (1917)이 처음 제시한 토모그래피 방법을 Hampson and Russell (1984)이 주시역산에 적용한 방법이다. 이 방법은 이미 국내외 학자들에 의해 여러 차례 발표된 바 있으므로, 여기서는 간략히 원리를 설명한다. 초동주시 t_i 는 파선경로를 따르는 역속도(slowness)를 적분하여 구할 수 있으므로, j 번째 셀에서 역속도 s_j ($j = 1, 2, \dots, N$)를 갖는 N 개의 셀로 구성된 모델의 i 번째 파선의 주시는,

$$t_i = \sum_{j=1}^N s_j l_{ij} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서 l_{ij} 는 j 번째 셀을 지나가는 i 번째

파선의 길이를 나타낸다.

굴절파는 속도분포에 따라 파선방향이 변하므로, 비선형 문제가 발생하게 된다. 이러한 비선형문제는 순차모델링과 선형역산 과정을 반복적으로 사용하여 실제값에 접근하는 방법으로 해결할 수 있다. 따라서 역속도는

$$s_{k+1} = s_k + \Delta s_k \quad (2)$$

로 표시된다. 즉, 다음번 역산 모델의 초기값(s_{k+1})은 현재 모델값(s_k)에 증분치(Δs_k)를 더해준 값이 된다.

주어진 셀을 통과하는 파선에 대한 증분치는 이를 개별적으로 계산하고 보정하는 ART (Algebraic Reconstruction Technique) 방법과 주어진 셀을 통과하는 모든 파선에 대한 증분치를 동시에 계산하여 동시에 보정하는 SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) 방법이 흔히 사용된다(Kim *et al.*, 2002; Deuker *et al.*, 1993). 이 연구에서는 역산과정 시 시간과 메모리를 절약할 수 있는 SIRT 방법을 사용하였다. SIRT 방법의 경우 j 번째 셀에서의 증분치(Δs_j)는

$$\Delta s_j \approx \frac{\sum_{i=1}^N \left(\Delta t_i \frac{t_{ij}}{T_i^c} \right)}{\sum_{i=1}^N l_{ij}} \quad (3)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 Δt_i 는 j 번째 셀에서 i 번째 파선의 측정치와 계산치의 주시차이, L_i 는 i 번째 파선의 총 길이, T_i^c 는 i 번째 파선의 측정된 총 주시이다. 이렇게 구한 증분치를 이용하여 각 셀들의 역속도를 수정하고 수정된 모델의 주시를 반복적으로 계산하여 셀의 역속도를 보정하는 과정을 반복한다.

다중채널 표면파 분석법(MASW)

푸리에 변환을 이용해 거리가 Δx 만큼 떨어진 두 수신점에 기록된 파형 $f(t)$, $g(t)$ 의 위상차이는 주파수영역에서

$$\Delta \phi(\omega) = \phi_f(\omega) - \phi_g(\omega) \quad (4)$$

로 표시되며, 이를 이용하여 표면파의 위상속도 $c(\omega)$ 를 계산하면,

$$c(\omega) = \frac{\omega \cdot \Delta x}{\Delta \phi(\omega) + 2n\pi} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다.

채널수가 많은 경우, 주어진 주파수에 해당하는 위상속도는 주파수 영역에서 위상이동 및 중합(phase shift and stack) 방법으로 구할 수 있다(Park *et al.*, 1999). 이 방법을 통해 $f(x, t)$ 의 2차원 자료를 푸리에 변환하여 $F(x, \omega)$ 를 구하고, 위상이동 및 중합 과정을 거치면

$$F(c, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, \omega) e^{i\omega x} dx \quad (6)$$

와 같은 위상속도 스펙트럼 $F(c, \omega)$ 를 구할 수 있다.

층상 구조에서의 레일리파 위상속도는 Thomson-Haskell 방법(Thomson, 1950; Haskell, 1953)으로 구할 수 있다. 총 N개 층으로 구성된 구조에서의 위상속도는 각 층의 S파 속도 v_{si} , P파 속도 v_{pi} , 밀도 ρ_i , 두께 h_i 의 함수로

$$c = c(f; v_{p1}, v_{s1}, \rho_1, h_1, \dots, v_{pN}, v_{sN}, \rho_N, h_N) \quad (7)$$

와 같이 표시될 수 있다. 측정된 위상속도 c_i^o 와 계산된 위상속도 c_i^c 의 차 Δc_i 는 근사식을 이용하면 1차원 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다. 또한 각 층의 두께를 일정하게 고정하고 종파속도와 밀도를 각각 Kitsunezake *et al.* (1990)와 Ludwig *et al.* (1970)의 경험식을 이용하여 횡파속도의 함수로 가정하였다. 따라서 측정된 위상속도 c_i^o 와 계산된 위상속도 c_i^c 의 차 Δc_i 는

$$\Delta c_i = \sum_{j=1}^N \left[\frac{\partial c_i}{\partial v_{pj}} \frac{dv_{pj}}{dv_{sj}} + \frac{\partial c_i}{\partial v_{sj}} + \frac{\partial c_i}{\partial \rho_j} \frac{d\rho_j}{dv_{sj}} \right] \Delta v_{sj}, i = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

이 되며, 일반적으로 감쇠최소자승법(Marquart, 1963)으로 식 (8)의 해를 구하게 된다.

등포아송비

포아송비는 x축과 y축의 변형률의 비로 나타내며, 이론적으로 0에서 0.5 사이의 값을 가지며, 포아송 조건을 만족시키는 암석은 0.25의 값을 갖는다. 등방성 매질의 경우 포아송비는 v_p 와 v_s 의 함수인 등포아송비,

$$\sigma = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (9)$$

이 되며, 비파괴 상태에서 구할 수 있는 장점이 있다. 또한 측정 혹은 계산한 v_p 와 v_s 값의 신뢰성을 검증하는데 효과적으로 사용되기도 한다.

자료획득

2012년 10월, 충청남도 보령시에 위치한 청천댐 부근에 지진계가 설치된 댐의 마루(C), 기초(T), 시추공(B) 부근에서 SH파 및 P파 굴절법과 표면파 탐사를 실시하였다(Fig. 1). 마루에서는 댐의 서쪽 끝으로부터 115 m 지점부터 184 m 지점 사이 길이 69 m의 동일 측선을 따라 SH파 및 P파 굴절법과 표면파 탐사를 수행하였다. SH파 굴절법 탐사 수행시 지면에 수평이며, 운동축이 측선에 수직이 되도록 8 Hz 수평지오폰 24개를 3 m 간격으로 설치하였다. 초동주시 토모그래피(Hampson and Russel, 1984) 해석의 신뢰성 확보를 위하여 타

Table 1. Acquisition parameters.

	SH-wave refraction	P and Surface waves
SOURCE		
- Type	5-kg Sledgehammer	5-kg Sledgehammer
- Plate	40 kg H-beam	16 × 16 × 2.5 cm aluminium plate
- Average Spacing		
crest line	16.5 m	16.5 m
toe line	4.8 m	4.8 m
borehole line	4 m	-
- Vertical Stack	300%	300%
RECEIVER		
- Type	8 Hz Geophone	4.5 Hz Geophone
- Spacing		
crest line	3 m	3 m
toe line	1 m	1 m
borehole line	4 m	-
- Number of Channel		
crest line	24	24
toe line	24	24
borehole line	12	-
RECORD		
- Recorder	Geometrics Geode	Geometrics Geode
- Record Length		
crest line	2 s	2 s
toe line	1 s	1 s
borehole line	1 s	-
- Sampling Interval		
crest line	0.5 ms	0.5 ms
toe line	0.25 ms	0.25 ms
borehole line	0.25 ms	-

격점은 측선의 중앙점, 1/4점, 3/4점, 양단, 양단에서 15 m 떨어진 지점 등 평균 16.5 m 간격의 모두 7 곳에서 실시하였다.

각 타격점에서 40 kg 철재 H-빔의 좌우 측면을 5 kg 해머로 각각 3회 수평으로 타격하고 중첩하여 Marthor 방식(Layotte, 1983)으로 발생시킨 신호는 동적 기록범위 144 dB를 갖는 24채널 Geode 기록계를 이용하여 샘플링 간격을 0.5 ms로 2048 ms 동안 기록하였다(Table 1). MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves; Park *et al.*, 1999) 표면파 탐사 방법을 적용하기 위하여, SH파 굴절법 탐사의 타격점과 동일한 7 군데 타격점에서 5 kg 해머를 지표면에 놓인 16 × 16 × 2.5 cm 알루미늄 받침판에 수직으로 타격하여 탄성파 신호를 발생시켰다. 발생된 신호는 3 m 간격으로 설치된 4.5 Hz 수직지오폰 24개로 수신하였고, 기록장비 및 기록에 사용한 현장변수는 SH파 굴절법과 동일하게 적용하였다. 또한 P파 굴절법은 별도의 자료기록 없이 표면파 탐사자료를 그대로 이용하였다.

댐기초 부근에서는 댐체 하부 끝 부분에 설치되어 있는 지진관측소를 중심으로 댐체 하부 배수로에서 약 2 m 평행하게 떨어진 23 m 측선을 따라 마루측선에서 사용한 장비를 동일하게 사용하여 SH 굴절과 및 표면파 탐사를 실시하였다. 이

Fig. 2. Raw data recorded in (a) the surface-wave profile on the crest of the dam, (b) the SH-wave profile at the toe of the dam, and (c) the SH-waves profile in the vicinity of the downstream borehole.

측선에서는 기반암까지의 깊이가 마루측선보다 얇은 것으로 예상되어 지오폰 간격을 1 m로 정하였으며, SH파 굴절법 탐사의 원격 타격점을 양단에서 3 m로 축소하였고, 샘플링과 기록길이를 0.25 ms와 1024 ms로 선택하였다(Fig. 2(a) and

Fig. 3. Data processing flow charts for (a) SH- and P-wave tomography and (b) the MASW method.

2(b)).

댐마루에서 152 m 하류에 위치한 시추공 지진계가 있는 지점에서는, 현장 여건상 양방향 전계가 어려워 시추공을 원점으로 동북동 방향으로 44 m 측선을 전개하였다. 마루측선이나 기초측선에서 사용한 것과 같은 탐사장비를 이용하여 4 m 간격의 12개 수신점에서 0.25 ms 간격으로 총 1024 ms 동안 자료를 기록하였다(Fig. 2(c), Table 1).

자료처리

SH파 초동주시 토모그래피

SH파 굴절법 초동주시를 토모그래피 방법으로 해석하기 위하여, 원시자료를 포맷변환, 타격점 및 수신기 배치정보 입력, 초동선택, 속도 분석, 초기모델 작성, 토모그래피 역산 등의 순으로 처리하였다(Fig. 3(a)). 수치 형태로 기록된 원시자료를 자료처리용 소프트웨어의 내부포맷으로 변환하였으며, 타격점 및 수신기의 위치를 입력하였다. 초동선택은 처리 결과에 직접적 영향을 미치므로 양단주시의 일치성 및 주시곡선의 평행성에 유념하여 신중하게 결정하였다. 주시곡선에서 개략적인 속도를 분석한 결과, 각 측선에서 겹보기 속도가 100 ~ 1000 m/s 정도의 속도 범위를 보인다(Fig. 4).

표층속도는 주시곡선의 근거리 주시 기울기로부터, 하부층들의 속도는 양단주시곡선에서 구간별로 구하였다. 이렇게 측선별로 얻어진 속도범위를 역산 초기모델의 매개변수로 사용

Fig. 4. First-arrival travel-time curves for the SH- and P-wave profiles (a) on the crest and (b) at the toe, and (c) for the SH-wave profile near the downstream borehole. The SH- and P-wave curves are indicated by red and black lines, respectively. Blue and green line segments indicate apparent SH- and P-wave velocities, respectively.

하였다. 초기모델은 깊이에 따라 단순히 속도가 증가한다는 가정 하에, 마루, 기초, 시추공층선에서 각각 31, 16, 16개의 두께가 일정한 층 모델을 사용하였다. 속도분석 과정에서 구한 속도로 초기모델을 설정하고, 10번의 반복수행을 거쳐 평균제곱근 오차가 마루층선에서 1.91 ms, 기초층선에서 2.72 ms, 시추공층선에서 1.62 ms로 수렴하는 2차원 속도모델을 각각 구하였다(Figs. 6(b), 6(e), and 6(g)).

P파 초동주시 토모그래피

P파 초동주시 자료는 별도의 자료획득 과정 없이 표면과 탐사를 위해 획득한 자료를 그대로 이용하였으며, SH파 초동주시 토모그래피와 같은 방식으로 처리하였다(Fig. 3(a)). SH파

Fig. 5. Best-estimate dispersion curves (red solid line) superimposed on phase velocity spectra from (a) the crest and (b) the toe of the dam. Solid black lines indicate minimum and maximum usable wavelengths.

초동 주시의 경우와 마찬가지로 양단주시의 일치성 및 주시곡선의 평행성에 유념하여 주시곡선을 선택하고 분석한 결과, 겉보기속도는 마루와 기초 부근의 측선을 따라 400 ~ 1650 m/s 정도의 속도 범위를 보였다(Fig. 4). 이렇게 구한 속도범위를 역산 초기모델에 사용하였다. 초기모델은 마루층선과 기초층선에서 두께가 일정한 31개와 16개 층으로 각각 구성되어 있으며 깊이에 따라 속도가 증가하는 모델로 설정하였다. 반복역산을 10회 수행하여 평균제곱근 오차가 마루층선과 기초층선에서 각각 4.59 ms, 기초에서 0.41 ms로 수렴하는 2차원 속도모델을 구하였다(Figs. 6(a) and 6(d)).

MASW 분석법

MASW 분석법은 SH파 초동주시 토모그래피 해석을 위해

Fig. 6. Two-dimensional v_p tomogram, v_s tomogram, and/or interpolated image derived by the MASW method (a-c) on the dam crest, (d-f) at the toe of the dam, and (g) near the downstream borehole. Black curves superimposed on the velocity tomograms indicate raypaths.

적용한 것과 같은 전처리 과정을 거친 후, 분산곡선 작성, 위상속도 분석, 초기모델 작성, 역산 등의 순으로 자료를 처리하였다(Fig. 3(b)). 최소 및 최대 수신기 간격이 마루측선과 기초측선에서 각각 3 m와 69 m, 1 m와 23 m이므로 공간 알려짐을 감안할 경우, 적절한 분석대상 파장은 각각 6 ~ 138 m, 2 ~ 46 m가 된다(Park *et al.*, 1999; Rix and Leipski, 1991). 그러나 기초측선의 경우 저주파수 영역에서 뚜렷한 경향성을 나타내므로 분석대상 파장 범위를 2 ~ 92 m로 선택하였다. 주파수의 함수로 표시된 속도스펙트럼에서 기울기는 파장을 뜻하며, 상파장 범위에 해당하는 주파수 영역에서 분산곡선을 작성하였다(Fig. 5).

역산을 위한 초기모델은 하부로 갈수록 속도가 증가하는 모델로 마루측선과 기초측선에서 각각 150 ~ 750 m/s 속도범위

를 갖는 두께 1 m의 31개와 21개 층으로 각각 구성하였으며, 선형 최소자승법으로 모델 수정과정을 10회 반복 수정하여 평균제곱근 오차가 각각 18.2 m/s와 33.1 m/s 이하인 v_s 값을 얻었다. 위상속도 분산곡선은 각 주파수에서 최대 유사성을 갖는 위상속도를 평활화하여 구하였다. 분산곡선에서 선택한 주파수와 위상속도의 관계를 역산하여 1차원 속도분포를 구하였으며, 각 타격점 위치의 1차원 속도구조를 거리방향으로 보간하여 v_s 단면(Figs. 6(c) and 6(f))을 얻었다.

동포아송비

마루측선에서 P파 초동주시 토모그래피로 구한 v_p 와 SH파 초동주시 토모그래피 및 MASW 분석법으로 구한 v_s 를 식 (9)에 대입하여 σ 를 계산하였다(Figs. 7(a) and 7(b)). 기초측선에

Fig. 7. Dynamic Poisson's ratios (σ) (a) and (b) on the dam crest, and (c) at the toe of the dam. S-wave velocities used to compute σ with P-wave velocity were derived from tomographic inversion (a and c) and surface-wave dispersion inversion (b).

서는 ‘분석 및 토의’ 부분에서 언급한 바와 같이 댐체의 영향으로 표면과 분산곡선이 왜곡되어, 상대적으로 신뢰할 수 있는 SH파 초동주시 토모그래피만을 이용하여 σ 를 구하였다(Fig. 7(c)).

분석 및 토의

마루측선

마루측선에서는 P파 초동주시 토모그래피 역산 결과(Fig. 6(a)) 및 SH파 초동주시 토모그래피(Fig. 6(b))와 MASW 방법으로 구한 v_s 단면(Fig. 6(c))들은 모두 수평적인 속도변화가 크지 않은 양상을 보여준다. P파 및 SH파 초동주시 토모그래피 역산 결과, 지표로부터 깊이 8 m까지의 구간에서는 v_p 가 450 ~ 600 m/s이고 v_s 가 230 ~ 250 m/s인 비교적 일정한 속도 범위를 가지며, 8 ~ 28 m 구간에서는 v_p 가 600 m/s부터 1650 m/s까지, v_s 는 250 m/s부터 880 m/s까지 깊이에 따라 속도가 거의 선형으로 증가한다. 이는 댐체 구성 물질이 동일하지 않거나 다짐 정도의 차이에서 비롯되었을 가능성이 있다. MASW 분석법으로 구한 v_s 의 경우에는 8 m 이내의 깊이에서

Fig. 8. S-wave velocities derived by the refraction tomography (red) and the surface-wave dispersion-curve inversion (blue) on the crest of the dam. The difference in v_s is significant deeper than 20 m.

약 210 m/s의 비교적 일정한 값을 가지며, 8 ~ 28 m 구간에서는 초동주시 토모그래피 역산 결과와 유사하게 200 m/s부터 500 m/s까지 선형적으로 증가하는 양상을 보인다. 그러나 20 ~ 28 m 구간에서는 390 ~ 500 m/s로, 동일 구간에서의 SH파 굴절법 결과인 450 ~ 950 m/s와는 큰 차이를 보인다(Fig. 8).

SH파 초동주시 토모그래피와 MASW로부터 구한 v_s 값을 이용하여 구한 σ 는 성토층(깊이 0 ~ 8 m)에서는 0.32 ~ 0.39와 0.38 ~ 0.42, 8 m 부근의 중심점토 상부경계에서는 0.41과 0.43 이상이 높은 값을 각각 나타낸다. 그러나 중심점토 부분에서는 각각 0.29 ~ 0.41과 0.40 ~ 0.45, 기반암 상부경계인 28 m 깊이에서는 0.24와 0.45로 큰 차이를 보인다. 이는 MASW 방법의 탐사심도 제약에 따른 것으로 판단된다. 따라서 깊이 20 m 이내의 깊이에 대하여서는 비교적 분해능이 높은 MASW 분석법으로 구한 v_s 를 신뢰할 수 있으나, 이보다 깊은 깊이에 대하여는 SH파 굴절법으로 계산된 결과를 해석에 이용하였다.

마루측선 서쪽 끝으로부터 5와 120 m 지점에 있는 시추공 BH-1 및 BH-2 위치(Fig. 1)에서는 깊이 3.5 m까지 실트, 모래, 자갈, 전석이 혼재하는 점토층이 존재하고, 그 하부에는 단단한 점토로 이뤄진 중심코아층이 기반암 깊이까지 존재한다(Korea Rural Community and Agriculture Corporation, 2011). 점토코아의 중심이 폭 16 m인 댐체의 북쪽으로 치우쳐 있고, 마루측선은 남쪽 가장자리에서 평균 2.5 m 떨어진 점을 감안할 때, 속도가 선형으로 증가하는 8 ~ 28 m 구간이 중심코아에 해당할 가능성을 완전히 배제할 수는 없다. P파 및 SH파 임계굴절을 이루는 28 m와 29 m 깊이에서의 평균 v_p 와 v_s 는 각각 1650과 940 m/s으로 급격히 증가하는 특징을 보여서 연

암 상태(Ministry of Construction and Transportation, 2004)의 기반암 경계임을 지시한다. 이는 시추공 BH-1 및 BH-2의 지질주상도 자료상의 연암 경계가 28 m와 29 m 깊이에 존재하는 것(Korea Rural Community and Agriculture Corporation, 2011)과 비교적 잘 일치한다.

기초측선

기초측선에서의 P파 (Fig. 6(d)) 및 SH파 (Fig. 6(e)) 초동주시 토모그래피 역산 결과는 모두 수평적 속도변화가 크지 않음을 보여준다. 지표로부터 깊이 2 m까지의 구간에서는 v_p 가 470 ~ 600 m/s이고, v_s 가 200 ~ 300 m/s인 느리고 비교적 일정한 속도를 가져서, 마루측선의 상부 매립층과 유사한 특징을 갖는다. 깊이 2 ~ 10 m 구간에서는 v_p 가 600 ~ 1650 m/s, SH파 굴절법으로 구한 v_s 는 300 ~ 900 m/s의 범위를 갖고 하부로 갈수록 속도가 빠르게 증가하는 모습을 보여서, 마루측선의 하부 매립층과 유사한 특징을 갖는다. P파와 SH파 파선 모두

10 m 깊이에서 임계굴절을 이루며, 이 굴절면에서의 평균 v_p 와 v_s 는 각각 1650과 940 m/s으로, 연암 상태의 기반암 경계를 지시한다. 상기 v_p 와 v_s 및 식 (9)를 이용하여 구한 σ 는 상부 매립층(깊이 0 ~ 2 m)에서 0.40 이상으로 높은 값을 나타내고, 하부 매립층 구간(깊이 2 ~ 9 m)에서는 0.33 ~ 0.40 범위의 값을 보인다. 기반암에 해당하는 9 m 깊이에서는 0.24로 계산되어 고화된 퇴적지층의 값에 해당한다.

MASW 분석법으로 획득한 v_s 값도 수평적 속도변화가 크지 않은 결과를 보여준다(Fig. 6(f)). 지표로부터 2 m까지의 구간에서는 160 ~ 170 m/s의 비교적 일정하게 나타나며, 이보다 깊은 겉보기 깊이 2 ~ 18 m 구간에서 180 ~ 550 m/s로 속도가 증가하는 모습을 보이고 18 m 깊이에서 680 m/s로 급격한 속도 증가를 보인다. 이후 속도가 점차적으로 증가하여 20 m 깊이에서는 740 m/s에 이른다. 이는 SH파 초동주시 토모그래피로 구한 역산 결과(Fig. 6(e))와는 많은 차이를 보이는데, 이는 측선으로부터 약 2 m 떨어져 평행하게 놓여있는 댐체 하부 배수로에 의한 영향으로 판단된다(Fig. 1). 측선 동쪽 끝에서 3 m 떨어진 지점에서 타격한 자료(Fig. 9(a))는 레일리파 군속도에 해당하는 140 m/s으로 표준경로시차보정(normal moveout correction)을 한 결과, 110 ms의 이벤트가 거의 수평이 되어 반사된 레일리파임을 지시한다(Fig. 9). 따라서 MASW 방법으로 구한 v_s 는, 측선과 댐체 사이의 거리 3 m와 댐체 표면의 기울기 22°를 이용하여 구한 깊이 2 m보다 깊은 깊이의 역산 결과는 신뢰하기 어렵다고 판단되어 해석에서 제외하였다.

시추공측선

SH 굴절과 탐사만을 수행한 시추공측선에서는 서남서에서 동북동 방향으로 갈수록 임계굴절면의 깊이가 10 m에서 12 m까지 깊어지는 특징을 보인다(Fig. 6(g)). 이 깊이까지의 v_s 는 140 ~ 810 m/s의 범위를 가지며, 임계굴절면에서의 평균 v_s 는 840 m/s으로 연암질 기반암으로 해석된다. 기반암 임계 위치로부터 서남서쪽으로 10 m 떨어진 곳의 시추공 BH-3(Fig. 1)에서는 두께 7.5 m의 토사층과 두께 0.5 m의 풍화토가 8 m 깊이의 연암층 위에 놓여 있어서, SH파 초동주시 토모그래피 해석결과와는 다소의 차이를 보이는데, 이는 20 m 이상 떨어진 거리의 효과인 것으로 판단된다.

결론

청천댐 마루, 기초, 하류 152 m 지점에서의 P파 및 SH파 굴절법과 표면파 탐사 방법으로 P파와 S파 속도를 구하고 분석한 결과, 다음과 같이 해석하였다.

23 m 높이의 댐마루에서는 지표로부터 8 m 깊이까지 $450 < v_p < 600$ m/s, $200 < v_s < 260$ m/s, $0.38 < \sigma < 0.42$ 인 토사층이 분포하며, 8 ~ 28 m 사이에는 $600 < v_p < 1650$ m/s,

Fig. 9. Common shot gathered data recorded on the seismic profile near the toe of the dam (a) before and (b) after normal moveout correction. The moveout velocity is 140 m/s.

$260 < v_s < 850$ m/s, $0.29 < \sigma < 0.41$ 인 단단한 중심점토로 구성되어 있고, $v_p = 1650$ m/s와 $v_s = 950$ m/s의 굴절과 속도와 $\sigma = 0.24$ 인 연암질 기반암이 28 ~ 29 m로부터 하부로 존재한다.

댐기초에서는 지표로부터 깊이 2 m까지, v_p , v_s 와 σ 가 각각 $470 < v_p < 600$ m/s, $200 < v_s < 300$ m/s, $0.40 < \sigma < 0.43$ 인 상부 매립층이 분포하며, 2 ~ 10 m 사이에는 $600 < v_p < 1650$ m/s, $300 < v_s < 900$ m/s, $0.24 < \sigma < 0.40$ 인 하부 매립층이 존재하고, 깊이 10 m에는 $v_p = 1650$ m/s와 $v_s = 940$ m/s의 굴절과 속도와 $\sigma = 0.24$ 인 연암질 기반암 상부 경계면이 존재한다. 한편 댐마루에서 152 m 떨어진 하류지점에서는 $v_s = 850$ m/s인 임계굴절면의 깊이가 10 ~ 12 m 깊이에 분포하며, 상부의 미고결층에서의 v_s 는 140 ~ 810 m/s의 값을 보여 댐마루 및 기초측선의 덮개층과 유사한 값의 범위를 갖는다.

댐마루와 기초측선에서는 SH파 초동주시 토모그램 역산으로 구한 v_s 보다 MASW 분석법으로 구한 v_s 가 얇은 깊이에서 상대적으로 높은 분해능을 갖는 특징을 보인다. 그러나 마루측선에서는 탐사심도의 제약으로 깊이 20 m 이하의 자료를 신뢰하기 어렵고, 기초측선에서는 3 m 떨어진 댐체 하부 배수로에 의한 간섭으로 신뢰성 있는 역산결과를 얻지 못하였다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-8040)의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 자료취득을 위하여 현장 접근을 허용하여 주신 한국농어촌공사 관계자 분들께 감사를 표합니다. 또한 자료분석 과정에 여러모로 도움을 주신 Réne Geophysics사의 Raymond Réne 박사님께도 고마움을 표합니다.

참고문헌

- Cho, I., and Yeom, J.-Y., 2007, Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam: *Geophysics*, **72**, G31-G38, doi:10.1190/1.2435200.
- Chung, S. H., Kim, J. H., Yang, J. M., Han, K. E., and Kim, Y. W., 1992, Delineation of water seepage in earth-fill embankments by electrical resistivity method, *The Journal of Engineering Geology*, **2**, 47-57.
- Dueker, K., Humphreys, E., and Biasi, G., 1993, Teleseismic imaging of the western United States upper mantle structure using the simultaneous iterative reconstruction technique, in *Seismic tomography: theory and practice*, Chapman & Hall, London.
- Ha, I., 2011, Evaluation for fundamental periods of domestic rockfill dams with micro-earthquake records, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, **12**, 53-66.
- Hampson, D., and Russel, B., 1984, First-break interpretation using generalized linear inversion: I. *Can. Soc. Expl. Geophysics*, **20**, 40-54.
- Haskell, N. A., 1953, The dispersion of surface waves in multi-layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **43**, 17-34.
- Kim, K. Y., Kim, D.-H., Shin, H. C., and Kim, Y.-J., 2002, Geological structures of the Ulsan fault in Yaksoo area of Ulsan using the method of refraction travel-time tomography, *Journal of the Geological Society of Korea*, **38**, 509-518.
- Kim, K. Y., Jeon, K. M., Hong, M. H., and Park Y.-g., 2011, Detection of anomalous features in an earthen dam using inversion of P-wave first-arrival times and surface-wave dispersion curves, *Exploration Geophysics*, **42**, 42-49; *Butsuri-Tansa*, **64**, 42-49; *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **14**, 42-49.
- Kitsunezake, C., Goto, N., Kobayashi, Y., Ikawa, T., Horike, M., Saito, T., Kurota, T., Yamane, K., and Okuzumi, K., 1990, Estimation of P- and S-wave velocities in deep soil deposits for evaluating vibrations in earthquake, *SINEN-SAIGAI-KAGAKU*, **9-3**, 1-17.
- Korea Rural Community and Agriculture Corporation, 2011, Detailed safety inspection report on Cheongcheon reservoir, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (current Korea Rural Community Corporation).
- Layotte, P. C., 1983, Marthor, an S-wave impulse source, SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983: 418-421.
- Ludwig, W. J., Nafe, J. E., and Drake, C. L., 1970, Seismic refraction in the Sea, vol. 4, part 1, Wiley-interscience, 74.
- Marquardt, C. W., 1963, An algorithm for least square estimation of nonlinear parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **11**, 431-441.
- Miller, S. L. M., and Stewart, R. R., 1990, Effects of lithology, porosity and shaliness on P- and S-wave velocities from sonic logs, *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **26**, 94-103.
- Ministry of Construction and Transportation, 2004, Seismic design code for utility-pipe conduit, 49p.
- Nations, J. F., 1974, Lithology and porosity from acoustic shear and compressional wave transit time relationships, Transactions of the Society of Professional Well Log Analysis Annual Logging Symposium, **15**, 1-16.
- Ohmachi, T., and Kuwano, J., 1994, *Dynamic Safety of Earth and Rockfill Dams*, A.A. BALKEMA/ROTTERDAM, 32-49.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, **64**, 800-808.
- Park, S. G., Kim, J.-H., and Seo, G. W., 2005, Application of electrical resistivity monitoring technique to maintenance of embankments, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **8**, 177-183.
- Park, S.-G., Song, S.-H., Choi, J., Choi, B.-G., and Lee, B.-H., 2002, Applicability of geophysical prospecting for water leakage detection in water utilization facilities, Proc. the 4th KSEG Conference, 179-195.
- Radon, J., 1917, Über die Bestimmung von Functionen Durcy ihre integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten, Bu.

- Succhass. Akad. Leipzig.: Math. Phys. K., 69, 262.
- Rix, G. J., and Leipski, E. A., 1991, Accuracy and resolution of surface wave inversion, in S. K. Bhatia and G. W. Blaney, eds. Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics: American Society of Civil Engineering, pp. 17-32.
- Song, S.-H., Kwon, B.-D., Choi, J.-H., and Kim, 2001, K.-M., Application of hydrogeological and geophysical methods to leakage problem of dike, *Journal of Korean Society For Geosystem Engineering*, **38**, 292-300.
- Song, S.-H., Lee, K.-S., Kim, J.-H., and Kwon, B.-D., 2000, Application of SP and pole-pole array electrical resistivity surveys to the seawater leakage problem of the embankment, *Econ. Environ. Geol.*, **33**, 417-424.
- Thomson, W. T., 1950, Transmission of elastic waves through a stratified solid, *Journal of Applied Physics*, **21**, 89-93.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H., Song, Y.-h., and Chung, S.-H., 2000, Dam seepage investigation using two- and three-dimensional resistivity surveys, Proc. the 2nd KSEG Conference, 41-53.
- Yi, M. J., Kim, J. H., and Chung, S. H., 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.