

풍암분지 시험시추공 주변에서의 지표 및 시추공 초동주시 토모그래피 동시역산

홍명호¹⁾, 김기영¹⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과, hmh2525@kangwon.ac.kr

Simultaneous tomographic inversion of surface and borehole seismic traveltime data in the Pungam basin

Myung Ho Hong¹⁾, Ki Young Kim¹⁾

¹⁾Department of Geophysics, Kangwon National University

요약 : 풍암분지 내에 위치한 시험시추공을 중심으로 서로 직각인 2개 측선을 따라 획득한 지표 굴절법 및 원거리 수직탄성과 자료의 초동을 토모그래피 방식으로 동시에 역산하였다. 지표 탄성과자료는 48개 타격점에서 5kg 해머로 발생시킨 지진파를 3 m 간격 21개 지표지오폰과 1개 3성분 공내지오폰으로, 수직탄성과 자료는 수평거리 -19.5~+19.5 m 범위에서 해머로 발생한 지진파를 공내 9~99 m 깊이구간에서 3성분으로 각각 기록하였다. 지진파총 자료를 이용하여 지표 굴절과자료의 지연시간을 보정한 후, 지표 및 시추공 초동자료를 동시에 역산하고 속도 토모그램을 작성하였다. 속도 토모그램은 시추공 위치에서 속도 750 m/s 이하의 표토층이 1.8 m 두께로 분포하며, 신선한 암석층이 깊이 12 m 정도부터 존재함을 보인다. 깊이 31~40 m 구간에서 5353 m/s의 암석층 속도는 깊이 65~73 m 구간에서 4262 m/s로 변한다. 시추코아 자료와 비교할 때, 이러한 큰 속도변화는 암중 및 파쇄의 영향인 것으로 판단된다.

주요어 : 동시역산, 토모그래피, 수직탄성법, 지연시간, 풍암분지

Abstract : Both surface seismic and far-offset VSP data were recorded along two mutually perpendicular profiles in the Pungam basin. The first-arrival times were simultaneously inverted using the tomography method. For the surface data, seismic energy was generated by a 5-kg sledgehammer at 48 stations and detected by 21 surface geophones at 3 m intervals and one 3-component geophone in test borehole for the purpose of static corrections. For the VSP data, seismic waves generated by the sledgehammer on the ground were detected by a 3-component borehole geophone in a depth range of 9~99 m. Delay times of the hammer data were corrected using the seisgun data before the inversion to yield velocity tomograms. The tomograms indicates that the soil layer with velocities less than 750 m/s averages 1.8 m thick. The velocity varies from 5353 m/s at the depth range of 31~40 m to 4262 m/s at the depth range of 65~73 m. Compared with core samples, the relatively large variation in velocity may due to lithology changes and fracture effects with depth.

Keywords : simultaneous inversion, tomography, VSP, delay time, Pungam basin

1. 서론

토모그래피 해석방법은 Hampson and Russell (1984)에 의해 굴절과 자료해석에 처음 사용된 이후, 토목기초(Docherty, 1992) 및 환경분야(Lanz et al., 1998)에 널리 사용되고 있다. 그러나 지표 탄성과 굴절법은 대부분의 에너지가 기반암 표면에서 임계굴절되므로 기반암 내부의 지질정보는 알기 어려우며, 지표부근의 속도가 느린 물질은 고주파 성분을 많이 감쇠시켜서 수직분해능이 낮아지는 등의 문제가 있다. 한편 시추공탄성파탐사는 수직분해능이 높은 반면에 공간적 해석범위가 시추공 주변에 한정되는 단점이 있다. 따라서 지표와 시추공 내에서 기록한 자료를 동시에 역산할 경우, 높은 분해능과 공간적 해석범위 확장을 기대할 수 있으며, 기반암층 내의 암상 변화와 파쇄대 등을 구명하는데도 적용할 수 있는 장점이 있다(Hayashi and Takahashi, 2001).

이 연구에서는 강원도 홍천군에 위치한 시험시추공 주변에서 발생시킨 탄성과 초동을 지표 및 시추공 내에서 기록하고, 토모그래피 방식으로 동시에 역산하여, 시추공 주변의 속도구조를 파악하고자 한다.

2. 자료 획득

측선은 주변 구조선 방향과 지형 등을 고려하여, 시추공을 중심으로 북북동-남남서(N20° E) 방향(측선 1)과 이에 수직한 방향(측선 2)으로 정하였다. 조사는 원거리 수직탄성법(far-offset vertical seismic profiling), 지표 굴절법 등 2회에 나누어 실시하였다. 지표 측점은 측선별로 24개이며 측점 간격은 3 m로 정하였다. 수직탄성과 자료는 측선 1의 거리 15~54 m 구간과 측선 2의 거리 18~51 m 구간에서 3 m 간격으로 5 kg 해머를 이용하여 탄성파를 발생시켰고 시추공 내에서 28 Hz 모서리 주파수를 갖는 3성분 지오폰을 깊이 61~99 m 구간은 2 m 간격, 깊이 9~61 m 구간은 1 m 간격으로 상승시키면서 수신하였다. 기록한 트레이스 수는 측선 1이 1008개, 측선 2가 864개이다(Fig. 1a). 지표 굴절과 및 타격시간 보정을 위한 조사에서는 각 타격점에서 5 kg 해머와 지연시간을 거의 무시할 수 있는 지진파총(seisgun)을 각각 사용하여 탄성파를 발생시켰다. 이 때, 수직탄성과 조사에 사용한 3성분 공내지오폰을 71 m 깊이에 고정시키고, 지표 굴절과조사에 사용한 지오폰을 시추공 주변 3개소를 제외한 지표 21개소에 설치하여 수신하였다(Fig. 1b). 기록계는 OYO사의 McSeis-SX를 사용하였고, 수신된 신호는 0.2 ms 간격으로 총 204 ms 동안 주파수 필터를 사용하지 않고 기록하였다.

3. 자료 처리

기록된 자료는 파원-수신기 배치정보 입력, 초동선택, 수신지연 보정, 발파지연 보정, 지표-시추공 자료 병합, 속도분석, 고도자료 입력, 초기모델 작성, 토모그래피 역산의 순으로 처리하였다(Fig. 2). 시추공에서 기록된 자료에는 초동주시가 불규칙한 양상을 보여 주어 타격 및 수신지연이 있음을 나타낸다(Fig. 3). 타격지연이 타격점별로 일정하다는 가정 하에, 각 타격점에서 지진파총을 이용하여 기록한 자료와 해머로 기록한 자료의 초동주시 차이로 타격점 정보정을 실시하였다. 보정량은 -1.1~2.3 ms 정도이며, 보정 후 주시는 불규칙한 성분이 많이 감소한 양상을 보인다. 수신지연은 1008개의 공발점 자료를 대상으로 초동의 경향성을 가장 잘 반영하는 3차 회귀분석을 이용하여 보정하였으며, 보정량은 -0.8~0.5 ms 정도로 작은 편이다. 타격점 및 수신점 정보정 후의 초동주시는 불규칙한 성분이 거의 사라진 모습을 보인다(Fig. 4).

지표와 시추공에서 수신한 초동주시 자료를 서로 병합하여 초동주시 토모그래피 방법으로

로 처리하였다. 측선 1과 측선 2의 초기모델은 수평거리 1.5 m의 근거리 수직탄성파에서 구한 650~5,222 m/s 범위의 구간속도를 이용하여 설정하였다. 20회 반복계산 동안 두 측선이 교차하는 시추공 주변 4.5 m 이내의 쉘들은 초기모델과 동일한 속도를 가지도록 제약조건을 가하였다. 역산 결과, 모델에서 계산한 파선의 주시와 역산에 사용한 초동주시의 평균제곱근 오차는 지표자료의 경우 측선 1과 2에서 각각 2.02 ms, 1.91 ms 이하로, 공내자료의 경우 각각 0.79 ms, 1.34 ms 이하로 수렴한다(Fig. 5).

한편, Fig 6은 깊이별로 파쇄정도를 파악하기 위해 시추공에서 얻은 코아를 이용하여 깊이 8 m부터 1 m 단위로 구한 암질지수(R.Q.D.)로, 부유PS검층기(suspension PS Logger)로 구한 구간속도와 함께 도시하였다(임경학·김기영, 2004).

4. 결과 및 토의

두 측선의 속도 토모그램은 속도 750 m/s 이하인 표토층이 평균 1.8 m의 두께로 존재하며, 깊이 12 m 부근에 평균속도 4327m/s 이상인 신선한 암석층이 분포하고 있음을 보여준다. 풍화암과 연암의 경계는 대략 속도 1250 m/s 등치선과 일치하며, 시추공 주변에서는 평균 2.8 m 깊이에 존재하는 것으로 해석된다.

주로 이질 암석으로 구성된 암석층 내부는 깊이 31~40 m 구간에 평균 5353 m/s 이상의 매우 빠른 속도 구간이 존재하며, 시추코아는 이 구간에 역이 많이 포함되어 있음을 보인다. 또한 이 구간에서는 R.Q.D와 음파검층으로 구한 구간속도 값이 빠르게 증가하여 파쇄나 절리가 적은 신선한 암석임을 지시한다. 한편, 깊이 65~73 m 부근은 약 4262 m/s의 상대적으로 낮은 속도를 갖는 구간이 존재하는데, 시추코아에서 판별한 암상은 사질이암으로 구성입자들이 매우 작다. 이 구간의 음파검층 자료에서도 저속도층의 존재가 확연히 인지되며(임경학·김기영, 2004), 공경검층에서도 공경의 증가가 관찰되어 상대적으로 약한 암석임을 나타낸다(장승익, 1998). 전체적으로 암석층 내의 속도변화는 시추코아자료에서 구한 R.Q.D 값과 잘 일치하며, 시추공 주변 암석 내의 속도변화는 파쇄정도에 가장 영향을 많이 받으며, 암상에도 일부 영향을 받는 것으로 분석된다.

이번 연구에서는 지표굴절과 자료와 수직탄성과 자료의 초동을 동시에 역산하여, 천부지질구조에만 제한적으로 사용되던 탄성과 굴절법의 해석 범위를 암석층 내부까지 확장시켰다. 동시역산을 통해 암석층 내부의 속도변화를 인지할 수 있어 암상의 변화와 파쇄대 위치, 규모 등을 구명할 수 있었다. 그러나 원거리 수직탄성과 자료와 동시에 역산하여 조사범위를 넓혔음에도 불구하고, 여전히 심부의 해석공간은 제한적인 문제가 있다.

참고문헌

- 장승익, 1998, 풍암지역 시험시추공에서 수행된 물리검층결과의 종합해석, 석사학위논문, 강원대학교.
- 임경학, 김기영, 2004, 풍암분지 시험시추공 주변 지하지질구조 연구, 대한지질학회 추계 학술발표회 초록집, 40.
- Docherty, P., 1992, Solving for the thickness and velocity of the weathering layer using 2-D refraction tomography, *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, **57**, 1307-1318.
- Hampson, D. and Russell, B., 1984, First-break interpretation using generalized liner inversion, *Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists*, **20**, 40-54.

Hayashi, K. and Takahashi, T., 2001, High resolution seismic refraction method using surface and borehole data for site characterization of rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **38**, 807–813.

Lanz, E., Maurer, H. and Green, A. G., 1998, Refraction tomography over a buried waste disposal site, *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, **63**, 1414–1433.

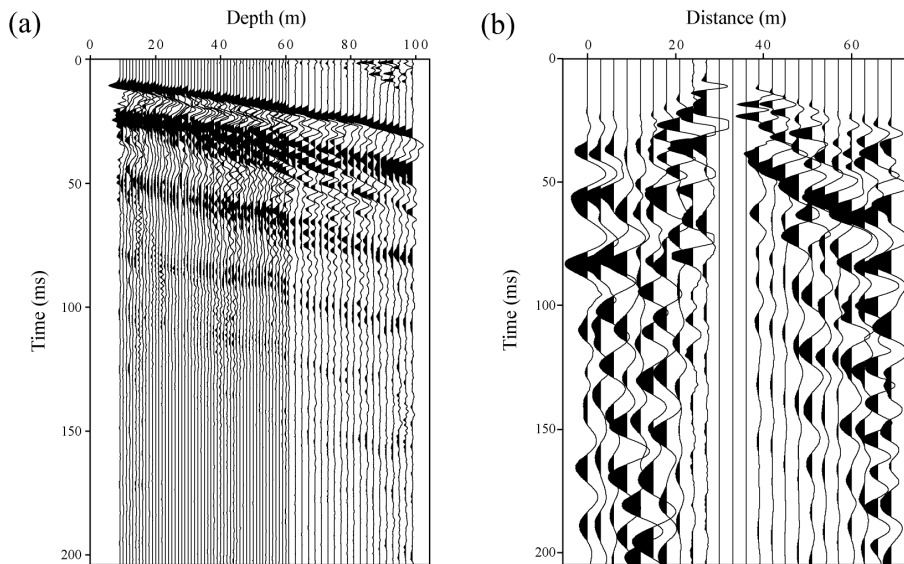


Fig. 1. Raw data for (a) the borehole and (b) the surface surveys, respectively.

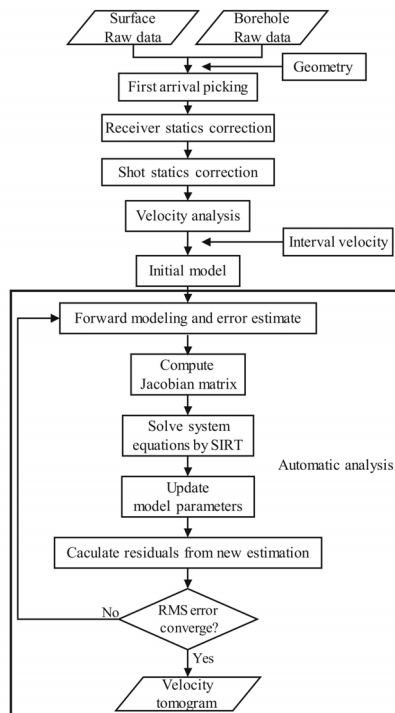


Fig. 2. Processing sequence for the surface-borehole simultaneous inversion.

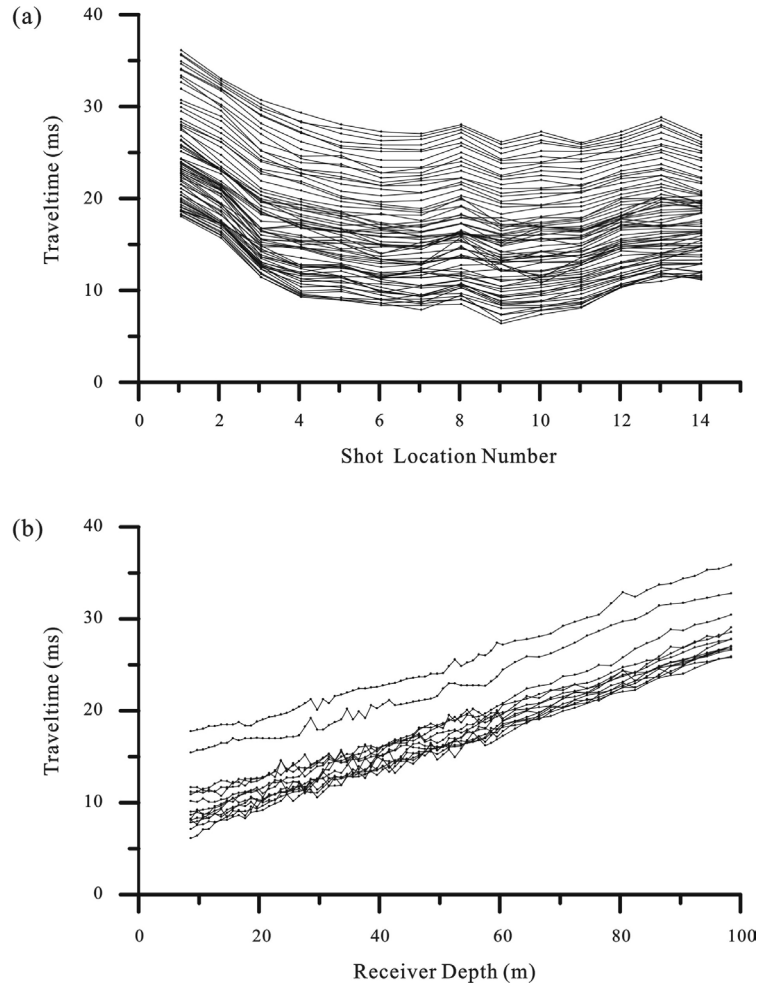


Fig. 3. First-arrival times of the borehole data: (a) common receiver and (b) common shot gathers, respectively.

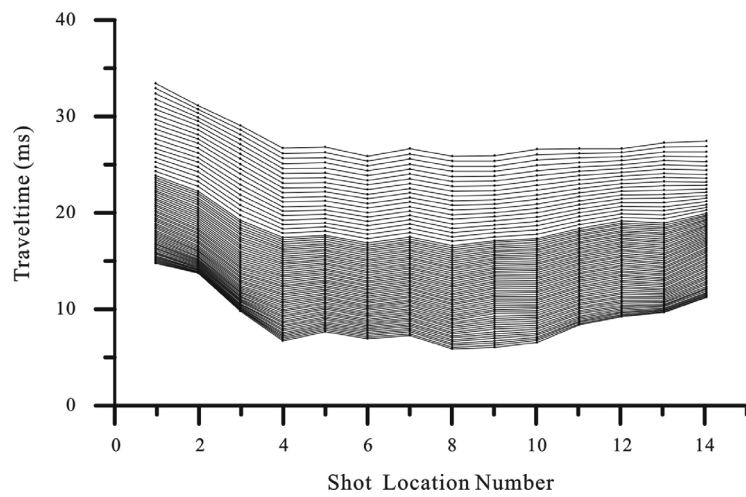


Fig. 4. First-arrival times after both receiver- and shot-static corrections. The corrected travel times show much smoother than the original data in Fig. 3a.

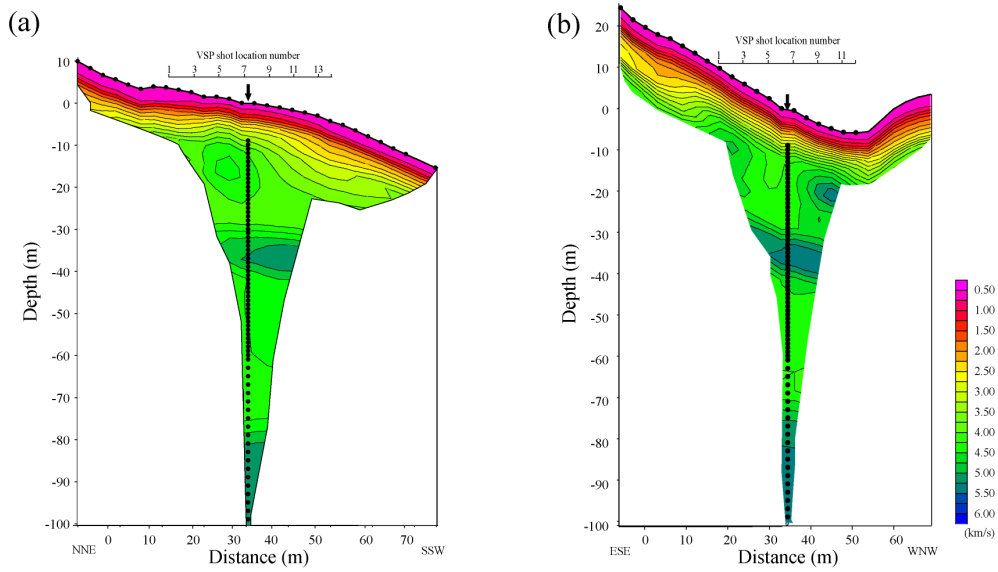


Fig. 5. Smoothed velocity tomograms of (a) Profile 1 and (b) Profile 2. Source and receiver locations are superimposed on the tomograms.

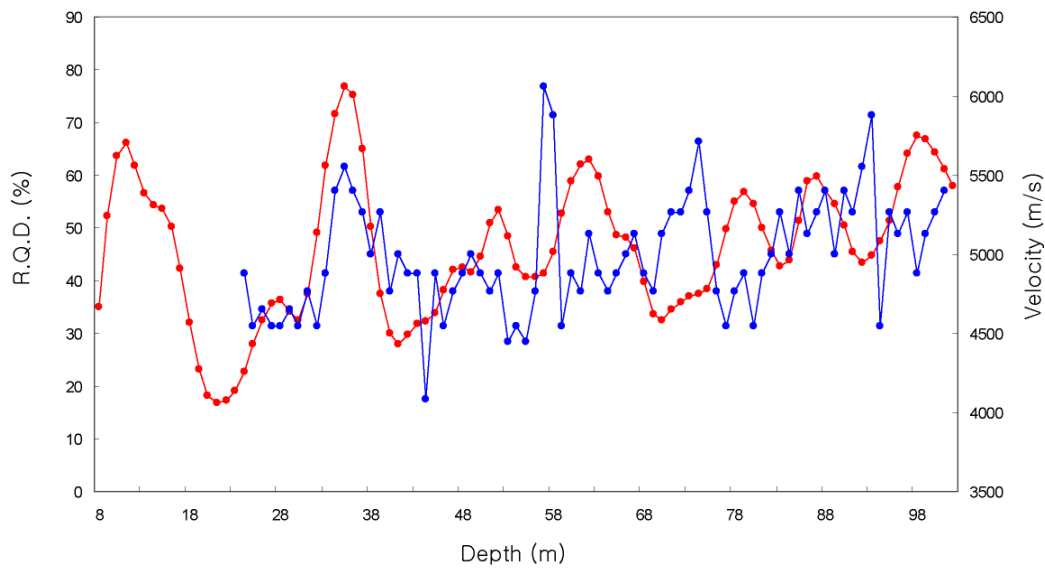


Fig. 6. Rock Quality Designation (R.Q.D.) from the core (red circles) versus interval velocities from sonic logs (blue circles).