

임펄시브 진원에 의한 공대공 탄성파기록으로부터 P파, S파 속도 영상도출에 관한 연구

이두성¹⁾

A Study for the Construction of the P and S Velocity Tomogram from the Crosswell Seismic Data Generated by an Impulsive Source

Doo Sung Lee¹⁾

요 약 : 공대공 탄성파 자료를 3개 단면에서 획득하였다. 이 단면들은 한 터널을 가로지르는데 단면상의 터널의 상태는 공동, 모래로 충전, 그리고 버럭으로 충전된 상태이다. 이 세 개 단면 기록으로부터 P와 S파의 초동을 발췌하여 P와 S 속도 토모그램을 작성하였다. 6개의 토모그램 중 단지 1개의 토모그램만이 터널의 영상으로 해석할 수 있는 국부적인 저속도 구간을 표출하였다. 이 토모그램은 공동상태의 터널을 지나는 단면의 P파 속도영상이다. 이 사실은 본 주시토모그래피의 공간 분해능을 산출한 수치해석결과와 일치하였다.

주요어 : P파 토모그램, S파 토모그램, 터널탐지

Abstract : Crosswell seismic data were acquired in three sections crossing a tunnel of 3 different types; one was empty, another was filled by sand, and the other was filled by rock debris. Both the P- and S-wave first arrivals were picked and the travelttime tomography was conducted to generate the P- and S- wave velocity tomograms on the all three sections. Among six tomograms, only one tomogram shows a low velocity zone that can be interpreted as a tunnel image. The tomogram is the P wave velocity image of a section that crosses an empty tunnel. The result of numerical analysis for the spatial resolution of the travelttime tomography was consistent to this finding.

Keywords : P-wave tomogram, S-wave tomogram, tunnel detection

서 론

공대공 토모그래피는 고속도로, 교량, 철도, 및 기타 지상/지하 구조물 건설을 위하 지반의 파쇄/연약대 영역확인등 지반 조사에서 보편적으로 사용되고 있으며, 이는 또한 암반 내의 공동 또는 터널 탐지 목적에도 적용되고 있다. 이러한 탐사에서 터널 등 소규모(직경 2m 이하) 이상대 탐지의 성공 여부는 탐사법의 분해능에 좌우되며 구성암석에 대한 탄성특성을 분석하기 위해서는 P파 뿐 아니라 S파 속도에 대한 정보도 필요하다.

이 연구에서는 국내에서 가장 보편적으로 사용되는 공대공 탄성파 자료획득법인 임펄시브형 송신원과 하이드로폰 수신기에 의한 탄성파 자료로부터 지반조사에서 측정하고자하는 중요한 물성의 하나인 매질의 P파와 S파 속도정보를 추출하고자 하였다. 이 논문에서 사용한 자료는 지하터널 시범지역에서 획득한 3개 단면 공대공 탄성파 자료이다. 이 3개 단면은 터널

(직경 2m)을 가로지르는데 이 단면 사이의 터널의 상태는 각각 공동, 모래, 그리고 버럭으로 충전되었다.

이 자료에서 인식된 S파는 전환파(converted wave)로서 원시자료(raw data)에서도 상당부분 관찰되며 FK 필터를 통하여 보다 선명하게 표출할 수 있었다. 이 자료를 사용한 연구로는 P파 초동을 이용한 속도 토모그램을 통한 터널의 영상화 시도(이두성, 2003a)와 회절신호를 이용한 터널의 영상화 시도가 있었다(고광범과 이두성, 2003). 본 연구에서 사용한 자료처리 소프트웨어는 속도분석은 ISU3D를 사용하였으며 초동 피킹 및 토모그래피는 EZTOMO를 사용하였다(신동훈 등, 2003; 이두성, 2003b).

자료획득

이 논문에서 사용한 자료는 송신원으로 OYO사의 OWS와 수신기는 24채널 하이드로폰에 의하여 샘플링 간격 0.125 ms

*2003년 8월 7일 접수

1) 한성대학교 정보공학부

본 연구는 한성대학교 공학연구센터 특별 연구비지원에 의하여 수행되었다.

로 획득된 총 3개 단면이다. 각 단면의 획득 파라미터는 다음과 같다.

단면 1:

- 시추공간 평균거리: 19.5 m
- 탐사구간(심도): 50~100 m
- 수진기 간격: 1 m
- 진원간격: 1 m
- 터널위치(심도): 80 m
- 터널상태: 공동

단면 2:

- 시추공간 평균거리: 13 m
- 탐사구간: 65~115 m
- 수진기 간격: 1 m
- 진원간격: 1 m
- 터널위치(심도): 90 m
- 터널상태: 모래로 충전되었음

단면 3:

- 시추공간 평균거리: 16 m
- 탐사구간: 65~115 m
- 수진기 간격: 1 m
- 진원간격: 0.5 m
- 터널위치(심도): 90 m
- 터널상태: 버력으로 충전되었음

자료처리

초동을 이용한 속도 토모그램을 도출하고자 적용한 자료처리는 다음과 같다.

1. 인접 트레이스와 비교를 통하여 피킹 오차를 시간 샘플간격(0.125 ms)보다 적게 하고자 기록의 샘플간격을 0.05 ms로 다시 샘플(resample)하였다. 이러한 자료처리 방법은 잔여 정보정(residual statics)에서 statics 값을 샘플 단위보다 적은 실수값으로 계산하여야 평활한 보정효과를 얻는 것과 같은 원리라 할 수 있다.
2. 송신신호 시작시간 보정은 측정하고자 하는 파의 주행시간이 짧은 경우 기록기의 triggering time 측정오차가 초동 측정의 정확도에 미치는 영향은 매우 심각하다. 따라서 송신신호 시작시간 정밀도 검토 및 보정이 필요하다(이두성, 2003a).
3. P파 이벤트는 대체로 양호하여 초동피킹은 EZTMO를 사용한 자동 모드로 실시한 후 잘못 피킹된 트레이스를 수동으로 수정하였다(이두성, 2003b). 한 단면(24 채널 50 record)을 피킹하는데 1 분 정도 소요되었다. Fig. 1에 표시한 기록은 P파 초동의 진폭이 최저가 되는 점을 피킹한 예이다.
4. S파의 초동 피킹을 위한 전처리로 튜브파 신호를 억제하

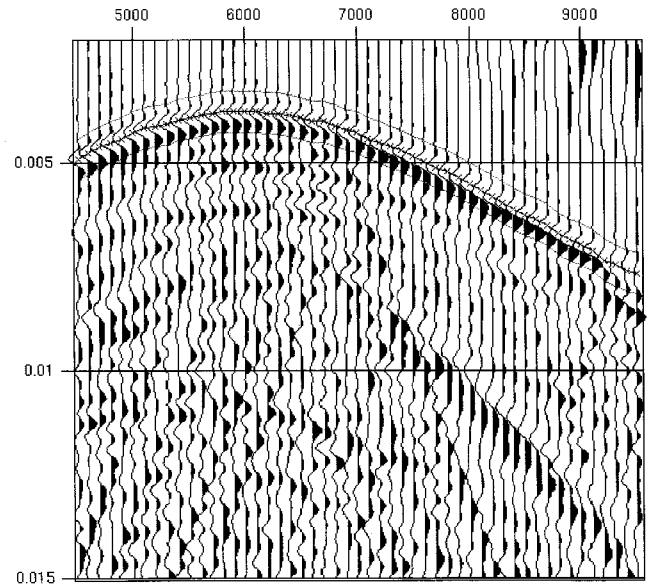


Fig. 1. P wave first arrivals (troughs) are picked on a common receiver gather.

기 위한 FK 필터링 및 공간 알리아싱(spatial aliasing)을 억제하여 보다 선명한 S파 초동인식을 위한 고주파 차단 필터(750 Hz)를 적용하였다(이두성, 2003a).

5. Fig. 1에서 보는바와 같이 S파의 초동 인식은 P파에 비하여 불확실한 기록들이 있다. S파 초동인식의 불확실성을 감소시키기 위하여 P파 속도를 참조하였다. Fig. 2에는 매질의 P-S-파의 속도를 분석하는 과정을 제시하였다. 왼쪽에 제시한 속도 스펙트럼에서 값이 현저하게 높은 부분을 마우스 왼쪽 버튼을 누른 채로 적당한 크기의 4각형으로 선택하면 영역 내에서 진폭이 가장 큰 이벤트가 선택되고 선택된 속도와 시간에

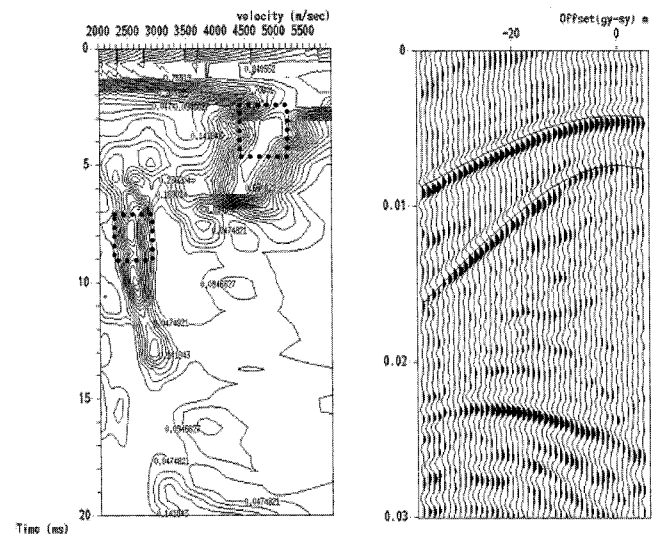


Fig. 2. Velocity spectrum at the left, and the NMO curves are overlaid on the record at the right. The picked (time, velocity) pairs are (4.2, 4840) and (7.4, 2560). After Lee (2003a).

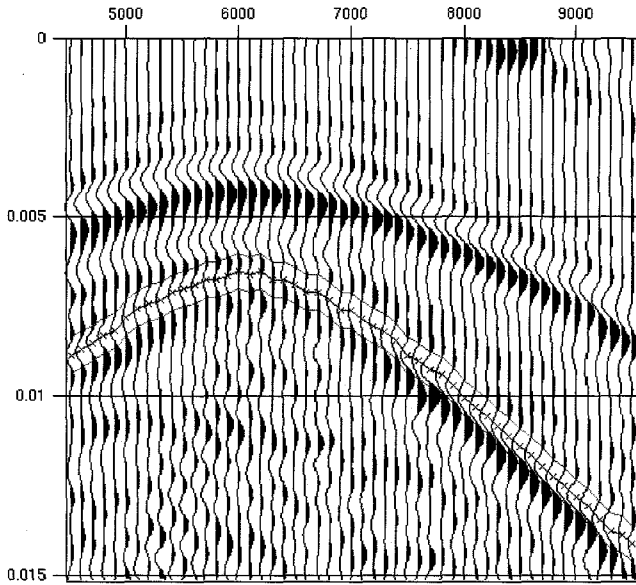


Fig. 3. S wave first arrivals (troughs) are picked on a common receiver gather. F-K and high cut filters are applied.

해당하는 hyperbola가 오른쪽 기록에 중첩하여 표시 된다(이두성, 2003a). 이 예시에서는 P파 초동을(4.2 ms, 4840 m/s)로, S파 초동은(7.4 ms, 2560 m/s)로 선택되었다. 여러 개의 기록에서 속도분석을 수행하였고 그 속도 비(V_p/V_s)를 평균 1.87로 산출하였다. 따라서 S파 초동은 P파의 초동에 대략 1.87을 곱한 시간 근처에 있을 것으로 추정하였고 모든 기록에서 예상되는 초동을 기록에 중첩 표시하고 이를 guide 시간으로 하고 EZTMO를 사용하여 자동모드 그리고 수동으로 수정하는 방법을 사용하였다(Fig. 3).

토모그래피

연구지역의 매질의 속도는 P파가 4,500~5,200 m/s S파가 2,500~2,800 m/s이다. 속도영상도출을 위한 토모그래피는 초기 속도모델은 P파는 5,000 m/s, S파는 2,500 m/s의 상속도 모델을 사용하여 파선추적에 근거한 주시 토모그래피법을 사용하였다(고광범과 이두성, 2002).

Fig. 4에 P파 속도토모그램 3단면을 제시하였다. 왼쪽으로부터 단면1, 단면2, 단면3에 대한 토모그램이다. 여기서 거리 및 심도 단위는 cm이다. 단면1에서는 터널이 있는 부근에서, 즉 심도 80 m 부근에서 독립된 국부적인 저속도 구간(4각형으로 표시된 부분)을 관찰할 수 있다. 그러나 터널이 충전된 구간인 단면2나 단면3에서는 터널이 있는 구간인 심도 90 m 부근에서 저속도 구간은 형성되고 있으나 단면1에서와 같이 터널로 인식될 수 있는 국부적인 저속도 구간은 확인할 수 없다.

Fig. 5에 S파 속도토모그램과 Fig. 6에 P파속도 대 S파속도 비(V_p/V_s) 토모그램 3단면을 제시하였다. 왼쪽으로부터 각각 단면1, 단면2, 그리고 단면3에 대한 토모그램이다. S파 속도영

상에서 표출된 속도분포는 대체로 대응하는 P파 영상과 유사하다.

상기 관찰된 사실을 분석하기 위하여 주시토모그래피 탐사의 분해능을 고려해보면 탐지 가능한 저속도 이상대의 크기를 예측할 수 있다(Lee, 1995). 이론적으로 탐지 가능한 저속도 이상대의 크기는 탐사방법의 공간 분해능과 관계가 있다. Krajewski *et al.*(1989)은 이상대의 최저크기는 이상대의 존재로 인한 주시의 지연이 주시 발체의 정확도(traveltime uncertainty)보다 커야한다는 사실에 근거하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$r_{\min} = \Delta t \cdot v_a \cdot v_b / |v_a - v_b| \quad (1)$$

여기서 v_a 와 v_b 는 각각 배경과 이상대의 속도이고 Δt 는 초동 발체정확도이다.

P파의 경우 식 (1)을 사용하여 탐지 가능한 이상대의 최저 크기를 계산할 때 Δt 를 1/4 ms로 하였다. 이는 발체정확도를 파장의 1/4 정도로 보고 기록의 주 주파수(1 KHz)를 고려하여 채택한 것이다.

단면1의 경우 $v_a=5000$, $v_b=3450$ 로 하면 r_{\min} 은 대략 1 m이고, 단면2와 3의 P파의 경우 $v_b=3500$ 으로 하면 r_{\min} 은 대략 3 m이다.

S파의 경우 공동에서는 존재하지 않으므로 단면 1은 고려할 수 없으며 단면 2와 3의 경우를 고려할 때, 이상대와 배경의 S파 속도를 대응하는 P파 속도와 일정한 비(평균 1.87)로 가정하고 P파와 비슷한 정도의 분해능을 가지려면 Δt 를 0.47 ms 정도를 확보해야한다. 즉 S파 초동의 주 주파수가 534 Hz 이상이어야 한다. 본 연구에서 사용한 자료는 임펄시브형 P파 진원에 의한 자료이므로 P파와 표면파 등의 간섭을 고려할 때 S파 초동의 발체 정확도는 이 수준을 초과하기 어려울 것으로 사료된다.

Fig. 6에 제시한 V_p/V_s 영상은 단면의 최상부와 최하부를 제외한 영역에서 1.8~2(평균 1.9)이다. P파와 S파의 속도비의 분포는 Fig. 4 또는 Fig. 5에 제시한 영상과는 다소 상이한 사실을 볼 수 있다.

V_p/V_s 는 매우 중요한 정보로서 P파 또는 S파 한가지만으로는 파악하기 힘든 매질의 또 다른 특성 정보를 제공한다. 특히 동일 암석 내에서 V_p/V_s 의 변화는 암상(lithofacies)의 변화를 제시한다 할 수 있다. 이 파라미터는 특히 퇴적암 또는 균열이 있는 변성암 등에서 암석의 공극율과 이방성 등에 대한 정보를 제공한다고 보고 되었다(Helbig, 1986; Eastwood and Castagna, 1986; and Tatham, 1982).

일반적으로 동일 암석 내에서 V_p/V_s 가 클수록 공극율이 높은 것으로 알려지고 있다. 단면 2와 단면 3에서보면 P- S파 영상에서 좌상측에서 우하측 방향으로 고속도대가 분포하는데 V_p/V_s 에서는 이 구간에서 대체로 낮은 값을 나타내고 있어서

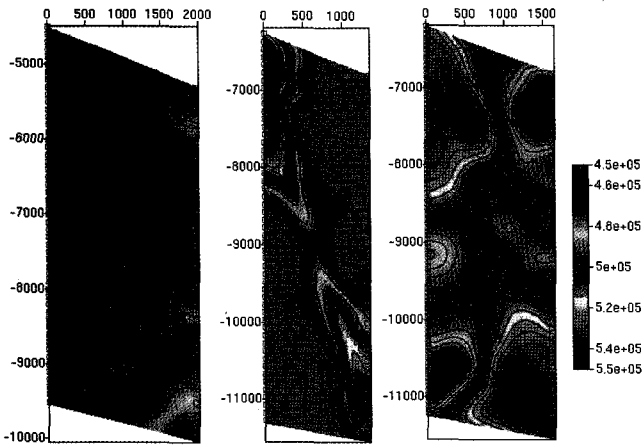


Fig. 4. P wave velocity tomograms. From left section 1, section 2, and section 3. Section 1 crosses an empty tunnel and sections 2 and 3 are crossing the tunnel filled by sands and rock debris, respectively. The distance unit is cm.

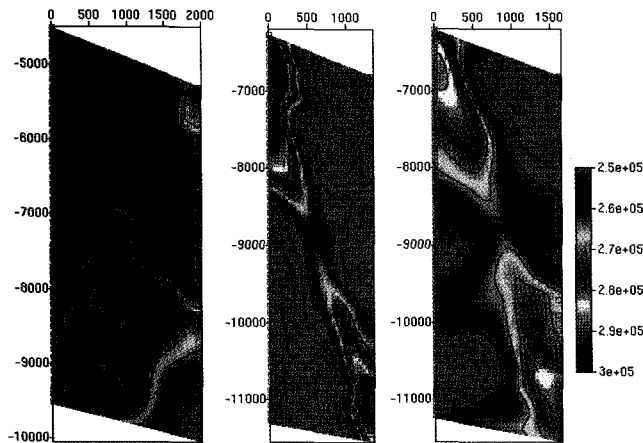


Fig. 5. S wave velocity tomograms. From left section 1, section 2, and section 3.

이 부분에는 주위보다 단단한 암석이 분포한다고 해석할 수 있다. V_p 와 V_s 에 대한 정보가 있을 경우 매질의 밀도를 알면 영률(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio), 전단계수(shear modulus) 및 체적 탄성율(bulk-modulus) 등의 탄성상수를 산출할 수 있다.

결론

터널 시범지역에서 서로 다른 3 형태의 터널을 가로지르는 3단면의 공대공 탄성파 자료를 획득하였다. 전처리 과정을 통하여 기록으로부터 P파와 S파의 초동을 성공적으로 발췌할 수 있었다. P-S파 초동을 사용한 주시 토모그래피를 실시하여 3개 단면에서 각각 P-S파 속도토모그램을 도출하였고 P파 영상과 S파 영상에서 표출된 속도분포는 대체로 유사함을 확인할 수 있었다. V_p/V_s 토모그램은 속도토모그램과는 상이한 분

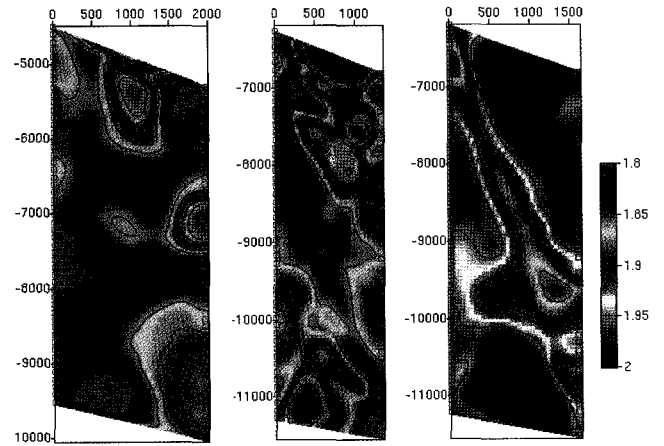


Fig. 6. Tomograms showing velocity ratios, V_p/V_s . From left section 1, section 2, and section 3.

포를 보이고 있고 동일한 암석 내에서 속도비의 변화는 암상의 변화를 지시하는 것으로 해석하였다.

3개 단면 중 터널이 비어있는 1개 단면의 P파 토모그램에서 터널의 존재를 인식할 수 있는 국부적인 저속도 구간이 형성되었고, S파 영상이나 P파의 나머지 2개 단면, 즉 터널이 모래 또는 버력으로 충전된 단면의 속도 영상에서는 이러한 특징적 구조를 확인할 수 없었다.

감사의 글

본 연구에서 사용한 시추공 탄성파 자료와 자료처리 소프트웨어는 국가지정 연구실 사업 "탄성과 영상화 기술 개발 및 응용"에서 획득 개발한 것이다. 한국과학기술기획평가원에 감사한다.

참고문헌

- 고광범, 이두성, 2003, 경암 내 소규모 공동 탐지를 위한 시추공간 탄성파탐사 기법의 적용성 연구: 물리탐사, 6(2), 57-63.
- 고광범, 이두성, 2002, 최적토모그램 도출을 위한 시추공간 파선 토모그래피 사례연구: 한국자원공학회지, 39(4), 266-272.
- 신동훈, 지준, 이두성, 2003, 지반조사를 위한 PC 기반의 3차원 탄성파 자료처리시스템 개발: 한국지구시스템공학회지 40, 48-57.
- 이두성, 2003a, 임펄시브형 시추공용 탄성파 송신신호 시작시간 측정에 관한 연구: 물리탐사, 6(2), 71-76.
- 이두성, 2003b, EZTOMO: 공대공 토모그래피 소프트웨어 시스템: 한국지구시스템 공학회 2003년도 추계학술발표회 논문집, 185-188.
- Eastwood, R. L. and Castagna, J. P., 1986, Interpretation of V_p/V_s ratios from sonic logs: Shear-wave exploration, Ed. by Dabom, S. H. and Domenico, S. N.: Geophysical developments No. 1, p. 139-153 (SEG publication)

- Helbig, K., 1986, Shear-waves - What they are and how they can be used: Shear-wave exploration, Ed. by Dabom S. H. and Domenico, S. N.: Geophysical developments No. 1, p. 19-36 (SEG publication)
- Krajewski, C., Dressen, L., Gelbke, C., and Ruther, H., 1989, Iterative tomographic methods to locate seismic low-velocity anomalies: A model study: *Geoph. Prosp.*, **37**, 717-751.
- Lee, D. S., 1995, Crosswell seismic study in a seismically poor data area: *Geophys.*, **60**(3), 758-764.
- Tatham, R. H., 1982, Vp/Vs and lithology: *Geophysics*, **47**, 336-344.