

임펄시브형 시추공용 탄성과 송신신호 시작시간 측정에 관한 연구

이두성¹⁾

A Study to Estimate the Onset Time of an Impulsive Borehole Source

Doo Sung Lee¹⁾

요 약 : 정확한 초동 발체는 고해상 속도 토모그램 도출에 중요한 요소이다. 주시 발체의 정확도에 영향을 주는 2가지 요인은 지질학적 요인과 기계적인 요인이 있다. 중요한 기계적인 요인은 발파시간 제어이다. 임펄시브형 시추공 탄성과 송신원에 의한 기록에서 다음과 같은 문제가 확인되었다. 즉, 불규칙한 발파시간 제어 문제와 기록에 나타난 발파시간의 불확실성이다. 이러한 발파시간 문제는 발체된 초동에 정확도를 저하시키게 되며, 따라서 속도 토모그램을 왜곡시키게 된다. 본 연구에서는 수평방향의 속도와 NMO 속도를 반복적으로 비교함으로써 최적의 발파시간을 산출하는 방법을 제시하였다.

주요어 : 시추공 탄성파탐사

Abstract : Accurate estimation of the first arrival travel time is an essential task to obtain a high resolution velocity tomogram. Accuracy of the travel time estimation may be influenced by two factors; geological and mechanical. A serious mechanical factor is the source firing control problems. We found the control problems in the records generated by some impulsive borehole sources. The problems are; irregular firing control and uncertainty in estimation of the absolute firing-times shown in records. Definitely, the time difference will introduce an error to the first arrival times, and accordingly; it will cause some distortion in the resulting velocity tomogram. A method to determine the firing time is suggested here. The method determines the optimum onset time by comparing the horizontal and the NMO velocity with various amount of delay time adjustment.

Keywords : cross-well seismic, onset time

서 론

시추공 탄성파탐사법은 지하 매질의 고해상 속도 정보를 획득하기 위하여 사용되는 물리탐사법 중 하나이다. 특히 공대공 탄성파법은 최근에 국내 엔지니어링 업계에서 지반조사 목적으로 자주 사용되고 있다. 이 논문은 공대공 탄성파법의 자료 처리에서 고려하여야 할 사항 중 하나인 송신원의 발파시간 측정과 측정오차가 해석 결과에 미치는 영향에 대한 연구 보고이다. 국내에서 사용되는 송신원은 임펄스 형으로 폭약, 에어건, 스파커, OWS 등이 있다. 임펄스 형 송신원 자료처리의 첫 단계는 정확한 발파 시간(triggering time) 산출 및 보정이다. 기록에 나타난 불규칙한 발파시간제어에 관한 연구는 에어건 기록의 경우(이두성, 1998)와 스파커 기록의 경우(고광범과 이두성, 2002)에 대하여 보고된 바 있다. 본 연구에서는 OWS를 사용한 기록에서 발견된 문제를 포함하여 송신신호의 정확한 시작시간(source onset time)의 측정이 불확실한 경우의 기

록에 대한 자료처리 방법을 제시하였고 부정확한 송신신호 시작시간이 속도영상에 미치는 영향에 대하여 토의하였다.

송신신호 시작시간 보정

공대공 탄성파 자료로부터 고해상 지하정보 영상을 도출하기 위해서는 각 기록의 정확한 초동 발체가 필요하며 따라서 송신신호 시작시간을 정확하게 측정하는 작업은 자료처리의 중요한 과정 중 하나이다. 송신신호 시작시간 측정에 대한 문제는 시스템의 성능과 관련되어 다음의 2가지 범주로 구분할 수 있으며 그 하나는 시스템이 매 송신마다 발파시간 제어가 일정치 못한 불규칙 자료를 내는 경우이고 그 두 번째는 송신원의 트리거 시작시간은 일정하나 절대적인 발파시각이 불확실한 경우이다.

첫 번째 유형으로는 에어건과 스파커 기록 중 일부에서 확인되었다. 트리거 시작시간의 오차가 주행시간에 비하여 미미

*2003년 3월 14일 접수

1) 한성대학교 정보공학부

이 연구는 2003년도 한성대학교 교내연구비에 의하여 수행되었다.

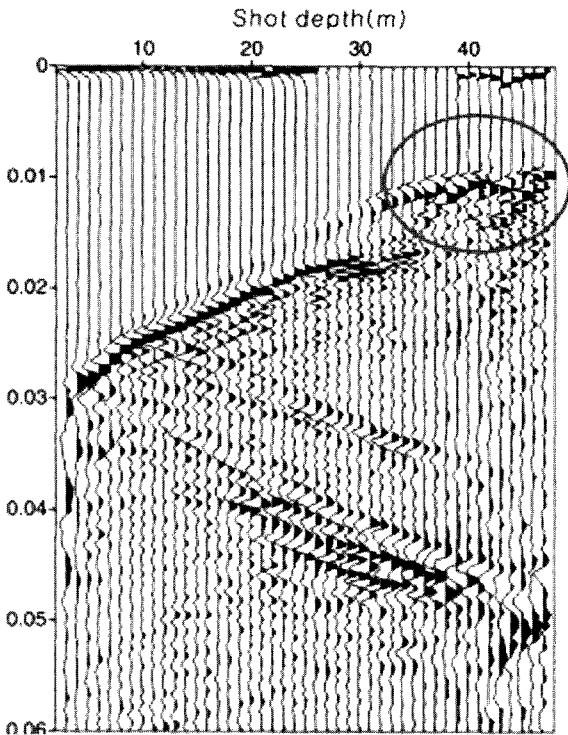


Fig. 1. A Sparker source data: A common receiver gather recorded at depth of 43 m in a borehole in Gwangju area (고광범과 이두성, 2002).

할 경우 이러한 오차를 원시기록으로부터 확인하기는 쉽지 않다. 일반적으로 공대공 탄성과 기록은 다중채널의 하이드로폰 수신기를 사용하여 공통 진원(common source) 모드로 획득되기 때문이다. 따라서 이의 확인 및 보정은 공통 수신점(common receiver) 모드 기록에서 하는 것이 바람직하다. Fig. 1은 다수의 진원으로부터 발생한 파를 한 개의 수신점에서 기록한 데이터이다. 이 경우 진원이 40 m 부근의 기록에서 발파시간의 제어에 문제가 있음을 볼 수 있다. 이러한 경우 보정방법은 반복적인 접근법과(고광범과 이두성, 2002), 공통 수신점 자료에서 발체된 초동을 2차식으로 최적 근사화한 후 이 다항식으로부터의 일정량 이상의 변이를 송신 정보정(source statics)으로 보고 이를 보정하는 방법 등이 발표된 바 있다(지준, 2002).

두 번째 유형은 OWS 기록에서 발견되었는데 발파시간의 제어는 상대적으로 규칙적이나 부정확한 시작시간을 가지는 경우이다. Fig. 2는 시추공간 거리가 대략 19.5 m인 지역에서 획득한 데이터이다. 그림에서 보는 바와 같이, 이 경우 시작시간의 불규칙함은 관찰되지 않는다. 이 지역의 매질 속도는 대략 4,500~5,500 m/s이며, 따라서 예상되는 초동은 대략 3.5~4.3 ms 정도이나 관찰된 최저 초동주기는 1.6 ms로서 실제보다 상당히 빠른 속도를 나타내며 이는 시스템의 트리거 시점이 실제 발파시각보다 앞서서 발생하는 오차이다. 따라서 기록은 대략 1.9~2.7 ms의 지연보정이 필요하다고 사료된다. 본 논문에서는 최적의 보정시간을 송신원과 수신점의 심도가 같은

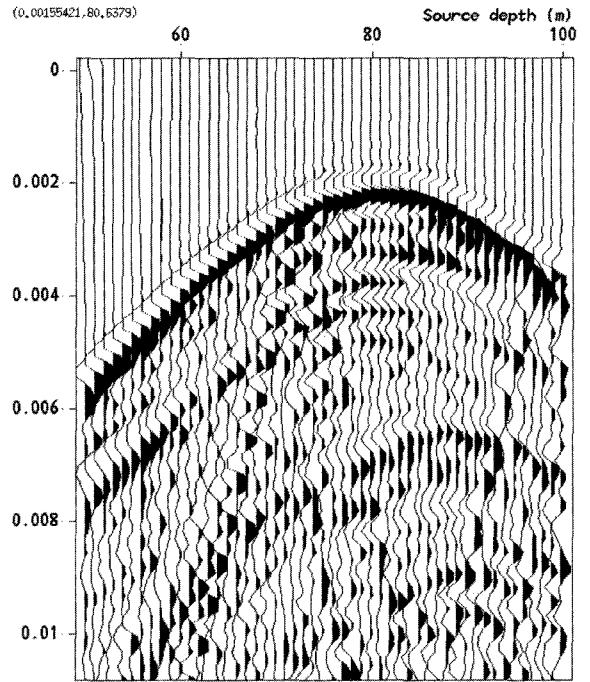


Fig. 2. An OWS data: A common receiver gather recorded at depth of 73 m in a bore-hole in Cheolwon area.

기록의 초동의 주기를 이용한 매질의 수평방향 속도와 초동의 무브아웃(moveout) 속도를 비교하여 산출하고자 하였다. 여기서 무브아웃속도는 송신점과 수신점의 심도차 대 초동시간의 변화를 말한다.

매질의 속도변화가 크지 않을 경우 공대공(crosswell) 데이터의 초동주기는 표면 탄성과 반사신호의 무브아웃 식을 유추하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T^2(x) = T_0^2(x) + \frac{x^2}{V^2} \tag{1}$$

여기서 x 는 송신점과 수신점의 깊이 차이, V 는 매질의 평균속도, 그리고 T_0 는 송신점과 수신점의 깊이가 동일한 파선의 초동주기이다(Fig. 3).

그리고 만일 발파시간 측정에 일정한 오차(Δt)가 있을 경우

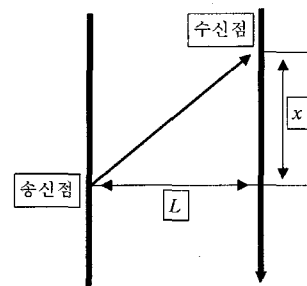


Fig. 3. A schematic showing source and receiver geometry in a cross-well survey.

Table 1. Velocity analysis for the onset time estimation

| Δt (ms) | T_0 (ms) | T_{min} (ms) | V_{horz} | V_{opt} (m/s) |
|-----------------|------------|----------------|------------|-----------------|
| 1.8 | 3.11 | 3.4 | 5,735 | 5,400 |
| 1.9 | 3.18 | 3.5 | 5,571 | 5,280 |
| 2.0 | 3.52 | 3.6 | 5,417 | 5,180 |
| 2.1 | 3.79 | 3.7 | 5,270 | 5,150 |
| 2.2 | 3.79 | 3.8 | 5,130 | 5,160 |
| 2.3 | 3.79 | 3.9 | 5,000 | 5,160 |
| 2.4 | 3.79 | 4.0 | 4,875 | 5,090 |
| 2.5 | 3.8 | 4.1 | 4,756 | 4,990 |
| 2.7 | 4.6 | 4.3 | 4,530 | 4,890 |

초동의 주시는

$$T(x) = \sqrt{T_0^2(x) + \frac{x^2}{V^2}} + \Delta t \quad (2)$$

과 같이 표시할 수 있다.

따라서 최적 Δt 를 구하는 방법으로 Δt 를 1.9~2.7 ms 구간에 반복적으로 설정하면서 반사신호의 속도분석과 같은 방법으로 식 (1)을 사용한 속도 스펙트럼에서 최적의 속도와 T_0 를 도출한다. Table 1에 이 분석 결과를 제시하였다. 이 표에서 T_0 와 V_{opt} 는 Fig. 4에 표시한 바와 같이 속도 스펙트럼에서 최대값을 보이는 위치에서의 시간과 속도를 말하며, T_{min} 과 V_{horz} 는 Δt 를 보정한 자료에서 예상되는 초동의 최저주시 즉 수평방향으로 전파된 파선의 주시와 이를 사용한 수평 평균속도를 말

한다. Δt 의 최적 보정값은 T_{min} 과 T_0 , 그리고 V_{horz} 와 V_{opt} 가 가장 근사한 경우로 볼 수 있다. 이 표에서 보면 Δt 가 2.2 ms에서 상응하는 시간과 속도가 가장 근사한 것을 볼 수 있다. 2.2 ms 보정하고 속도분석을 실시하였다(Fig. 4). 이 그림에서 gy 와 sy 는 각각 수진점과 송신점의 깊이를 나타낸다. 여기서 사용한 기록은 수진기 심도가 58 m인 공동 수진점 기록이다. 속도 스펙트럼에서 보면 (T_0, V)가 (4.2, 4840)과 (7.4, 2560) 부근에서 진폭이 큰 것을 확인 할 수 있다. 이 값들을 사용한 nmo 곡선을 기록에 중첩 도시하였다. 여기서 확인 되는 두개의 현저한 신호는 P파와 S파의 초동 신호로 사료된다.

속도 분석을 보다 정확하게 하기 위해서는 상당한 수준의 튜브파를 제거한 후에 실시하는 것이 바람직하다. 튜브파 제거는 주파수-과수 영역에서 쉽게 처리될 수 있다. Fig. 5b에서 튜브파 신호(화살표로 표시)는 (주파수, 과수)가 (250, 0.2)로부터 (750, 0.5)에 분포하며 주파수 750 Hz에서 alias 됨을 알 수 있다. 주파수-과수 영역에서 필터링한 결과를 Fig. 5c에 제시하였다. 이때 aliasing을 방지하기 위하여 750 Hz 고주파 차단 필터를 적용하였다. Fig. 5c에서 보면 P파와 S파가 잘 나타나고 있다. 일반적으로 국내에서는 공대공 탄성파의 자료분석은 P파의 토모그램을 사용하고 있다. 그러나 매질의 P파와 S파의 속도를 측정함으로써 매질의 탄성특성을 보다 잘 파악할 수 있다. 특히 S파는 매질의 물성 즉 공극율, 공극 형태(pore aspect ratio), 그리고 이방성 등에 대한 정보를 제공 한다고 보고 되었다(Helbig, 1986; Eastwood and Castagna, 1986; and

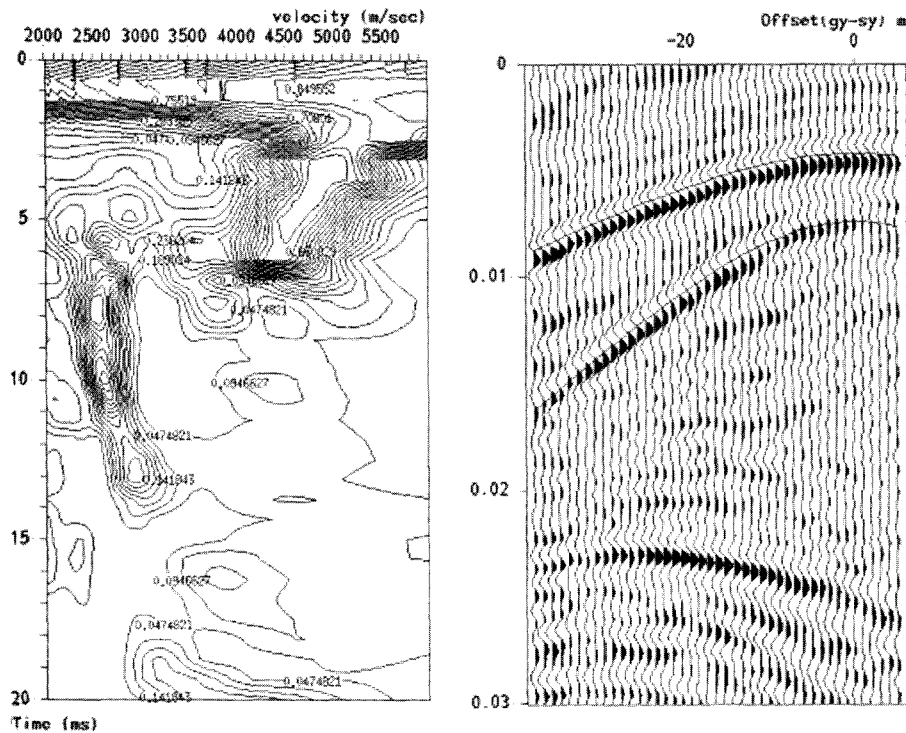


Fig. 4. Velocity spectrum at the left, and the NMO curves are overlaid on the record at the right. The picked (time, velocity) pairs are (4.2, 4840) and (7.4, 2560).

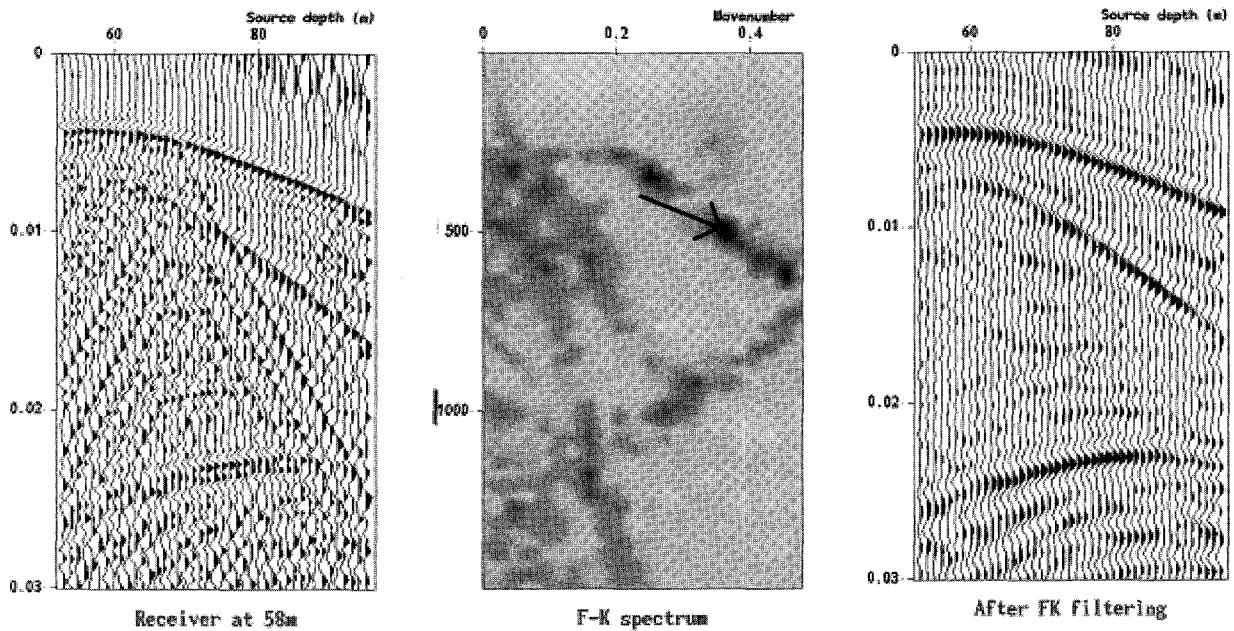


Fig. 5. A common receiver gather; from the left; the raw record, F-K spectrum of the record, and the filtered record.

Tatham, 1982).

주시 토모그래피(travel time tomography)

주시 토모그래피에 의한 공대공 탄성과 자료 분석은 초기속도 모델을 필요로 한다. 일반적으로 초기모델은 상속도 또는 수평방향으로 일정한 속도를 갖는 층서모델을 사용한다. 층서모델을 구성하려면 수평방향으로 전파된 기록들을 발체하고 초동을 피킹하여 각 레벨에서 매질의 평균속도를 구할 수 있다. Fig. 6에 이 분석 결과를 제시하였다. 그림에서 보면 매질은 크게 3개 구역으로 구분할 수 있다. 즉 깊이 55~75 m 구간은 속도가 4,900~5,000 m/s, 깊이 76~84 m 구간은 속도가 대략 4,700 m/s, 85~93 m 구간은 속도가 4,600 m/s이다.

주시 토모그래피 공정의 가장 중요한 요소 중 하나는 초동의 정확한 측정이다. 초동측정의 정확도에 영향을 주는 요소로는 초동신호의 질(S/N; 신호대 잡음비)과 기록기의 시스템반응이다. 기계적인 영향은 위에서 논의한 바와 같은 송신신호 시작시각의 불확실성이다. 기록의 S/N 비는 필터링 등의 처리를 통하여 증진시킬 수 있다. 송신신호 시작시각의 불확실성은 위에서 설명한 바와 같이 초동의 무브아웃 속도와 평균 수평속도와 비교하여 대략 보정할 수 있다.

송신신호 시작시각이 토모그래피에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 발체된 초동을 상하로 이동시킨 후 역산을 수행하고 결과를 비교분석하였다. 초동주시를 일정하게 1.95, 2.2, 2.45, 3.2 ms을 이동 시킨 후 역산을 수행하였다. 이 시간은 위에서 최적의 보정 시간으로 도출된 2.2 ms을 중심으로 2샘플(0.25 ms)과 1 ms을 이동시킨 시간들이다.

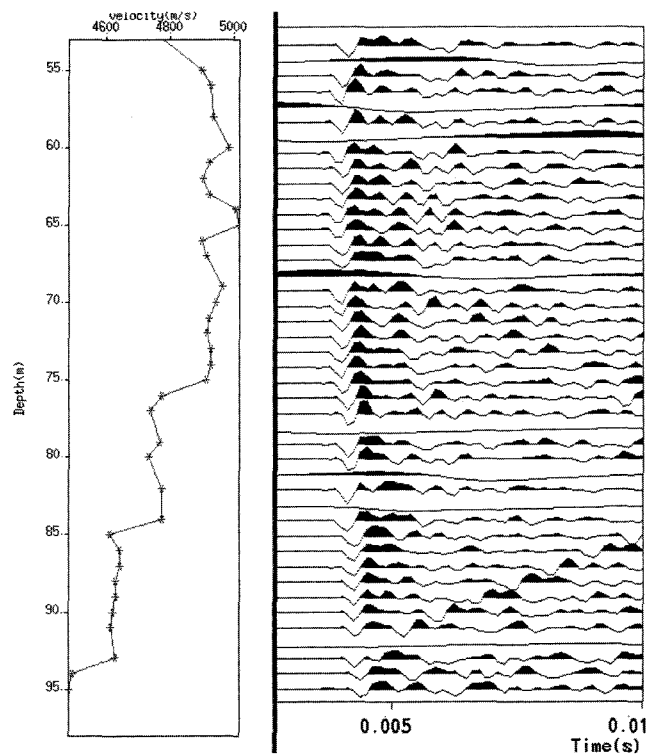


Fig. 6. Horizontal velocities derived from the horizontally propagated traces.

여기서 속도 역산의 초기속도 모델은 상속도 모델을 사용하였으며 초기속도는 각각의 모델에서 수평방향의 평균속도를 사용하였다. 그 결과는 Fig. 7에 제시하였다. 토모그램은 왼쪽으로부터(모델 1, 2, 3, 4로 하자) 초동을 1.95-, 2.2-, 2.45-, 3.2- ms 보정하고 역산한 결과이다. 여기서 사용한 단위는 거

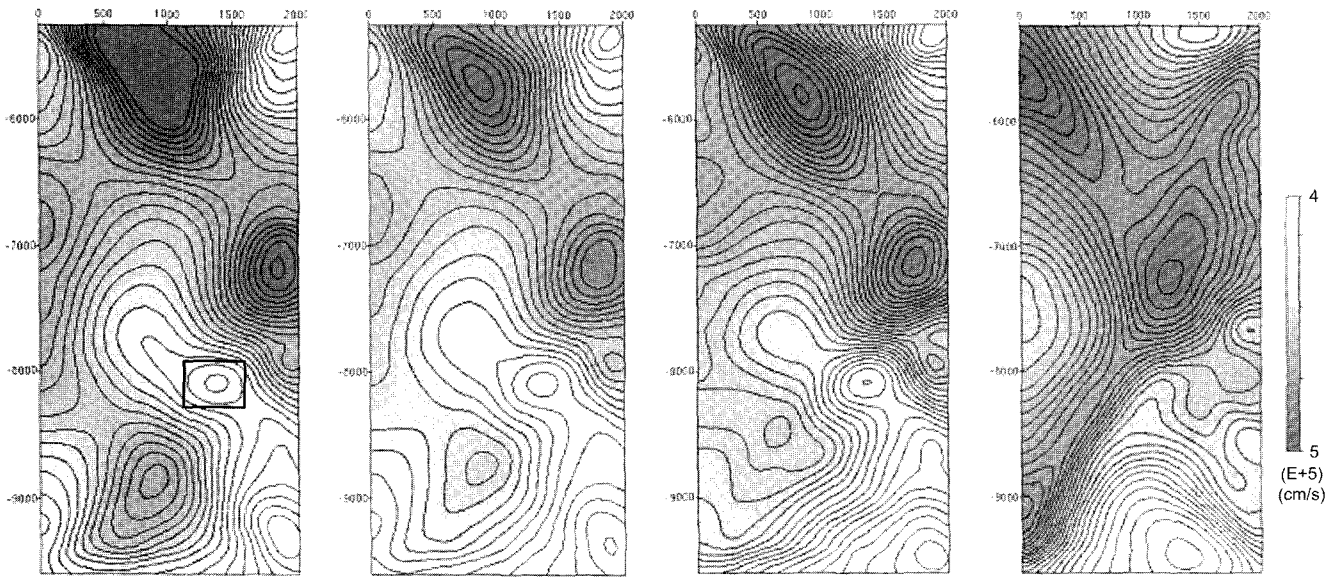


Fig. 7. Velocity tomograms from the top left in clockwise; with time shift of -0.25-, 0-, 0.25-, and 1-ms, respectively. The velocity ranges from 4800 m/s (white) to 6000 m/s (gray).

리는 cm이고 속도는 cm/s이다. 이 그림에서 보면 속도분포의 양상은 3.2 ms을 보정한 경우는 다른 3 모델과 매우 상이한 결과를 보이고 있다. 여기서 제시한 토모그램은 상속도 초기 모델로부터 파선추적을 사용한 SIRT 방법의 역산을 50회 수행한 결과이다. 사용한 초기 속도는 모델 1이 5,800-, 모델 2는 5,400-, 모델 3은 5,000-, 그리고 모델 4는 4,800- m/s이다. 상기 4개 역산의 반복 역산의 오차감소를 Fig. 8에 제시하였다. 각 모델에 해당하는 변화를 선의 굵기로 표시하였다. 선의 굵기가 제일 얇은 선이 모델 1이고 가장 굵은 선이 모델 4의 경우이다. 4개 모델 모두에서 안정적으로 수렴하는 사실을 확인할 수 있다.

본 기록은 터널이 존재하는 지역에서 획득하였다(고광범과 이두성, 2003). 사전정보에 의하면 공동은 80 m 심도에 존재하며 중앙에서 다소 오른쪽으로 치우친 것으로 알려졌다. 모델 1~모델 3의 경우는 예상되는 공동의 위치에서 저속도 이상대(4각형으로 표시된 부분)를 형성하고 있으나 모델 4의 경우는 이러한 이상대를 확인할 수 없다. 이 실험 결과는 기록의 onset time 오차가 토모그램으로부터 도출할 수 있는 패턴에 심각한 영향을 줄 수 있다는 사실을 제시한다고 할 수 있다. 모델 1~3은 최적 onset time에서 ± 0.25 ms(2 샘플) 오차가 있는 경우이고 모델 4는 8샘플의 오차가 있는 경우이다. 심부의 저속도구간의 분포는 4개의 토모그램 모두에서 확인되는데 이는 Fig. 6에 제시된 매질의 속도 분포와도 일치한다.

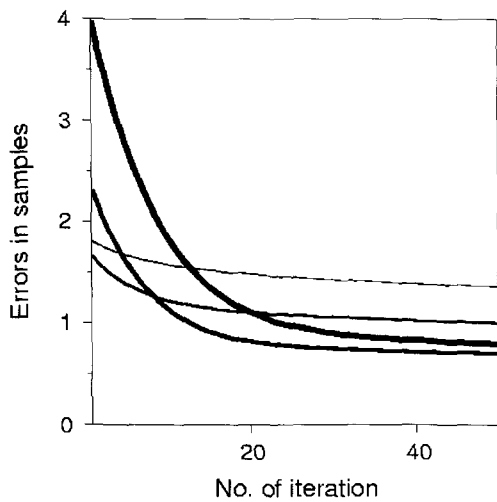


Fig. 8. The RMS errors with respect to the iteration number. 4 curves with different thickness denote 4 different model; As the line thickness increasing; model 1, model 2, model 3, and mode 4.

결론

공동 탄성과 자료로부터 고해상 지하정보 영상을 도출하기 위해서는 정확한 초동 발체가 필요하며, 이 때 발파시간을 정확하게 산출하는 작업은 자료처리의 중요한 과정 중 하나이다. 발파시간 측정에 대한 문제는 발파시간의 제어가 상대적으로 불규칙한 경우와, 발파시간의 제어는 상대적으로 규칙적이거나 절대적인 발파시간이 불확실한 경우이다. 본 논문에서는 후자의 경우 최적 발파시간을 도출하는 방법으로 표면 탄성과 반사 신호의 속도분석 기법을 이용한 방법을 제시하였다.

부정확한 발파시간에 의한 초동의 오차가 속도 토모그램에 미치는 영향을 분석한 결과 본 기록의 경우 오차가 0.25 ms 이내인 경우는 예상되는 부분에서 저속도 이상대를 확인할 수 있는 토모그램을 얻을 수 있었고 오차가 1 ms인 경우는 이 이상대를 확인할 수 없는, 속도분포가 상이한 토모그램을 얻었다.

따라서 발파시간의 정확한 측정은 공대공 탄성과 자료로부터 고해상 토모그래피의 도출에 필수조건이라 하겠다.

감사의 글

본 연구에서 사용한 시추공 탄성과 자료와 자료처리 소프트웨어는 국가지정 연구실 사업 “탄성과 영상화 기술 개발 및 응용”에서 획득 개발한 것이다.

참고문헌

고광범, 이두성, 2002, 최적 토모그래피 도출을 위한 시추공간 파선토모그래피 사례연구: 한국자원공학회지, **39**(4), 266-272.
 고광범, 이두성, 2003, 경암 내 소규모 공동 탐지를 위한 시추공

간 탄성과탐사 기법의 적용성 연구: 물리탐사, **6**(1), 28-34.
 이두성, 1998, 지하공동 충전효과 검토를 위한 시차 공대공 탄성과 토모그래피연구: 물리탐사, **1**(1), 25-30.
 지준, 2002, 시추공탄성과 자료의 송신기 정보정 알고리즘: 물리탐사, **5**(3), 193-198.
 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)
 Eastwood, R. L. and Castagna, J. P., 1986, Interpretation of Vp/Vs 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)
 Tatham, R. H., 1982, Vp/Vs and lithology: *Geophysics*, **47**, 336-344.