

초동 주시 측정 오차로 제어된 공대공 주시 토모그래피 사례연구

이두성*
한성대학교

A Case Study on the Cross-Well Travel-Time Tomography Regulated by the Error in the Measurement of the First Arrival Time

Doo Sung Lee*
Hansung University

요 약: 시추공 주시 토모그래피의 주요 요소 중 하나인 초동주시의 측정오차 정보를 사용한 주시 토모그래피 법을 제안하고, 이 역산 방법을 실제 시추공 탐사 자료에 적용하는 실험을 수행 하였다. 제안된 역산방법은 2단계 제어 처리 공정이다. 1) 성취하고자하는 속도 영상의 분해능에 기초하여 측정 주시의 허용 오차한계를 설정하고 측정오차가 오차한계 이상인 기록은 역산에서 제외한다. 2) 반복역산 과정에서 계산된 주시 차 중에서 해당기록의 측정오차 보다 작은 주시 차를 0(영) 처리함으로써 무의미한 수치가 누적되어 속도 개선에 기여함을 방지한다. 모든 기록을 사용한 속도영상과 제어 역산으로 도출한 속도영상을 비교한 결과에 의하면, 제어 역산으로 도출한 속도영상에서 수치잡음이 상대적으로 적게 표출되었다. 그리고 Fermat 원리에 의하면, 이 영상이 보다 현실가능성이 높은 속도모델임을 확인하였다.

주요어: 주시토모그래피, 초동주시 측정오차

Abstract: An inversion method regulated by the error in the measurement of the first arrival time was developed, and we conducted a feasibility study by applying the method to a real cross-well seismic data. The inversion is a two-step regulation process; 1) derive the measurement error bound based on the resolution of the velocity image want to derive, and exclude the records whose picking error is larger than the error bound, 2) set the travel time residual to zero if the residual is less than the measurement error. This process prevents the trivial residuals are accumulated and contribute to the velocity-model update. Comparison of two velocity images, one by using all records and another by using the regulate inversion method, shows that the later velocity image exhibits less numerical artefacts, and it also indicates that, according to the Fermat's principle, the latter image is a more feasible velocity model.

Key words: travel time tomography, picking error

서 론

시추공 주시 토모그래피는 탐사구간을 투사한 다수의 탄성과 초동주시를 사용하여 시추공사이 매질의 속도분포를 규명하는 탐사법이다. 주시 토모그래피 시스템의 입력 자료는 초동주시와 초기 속도모델이고 출력모델은 속도영상이다. 따라서 도출된 속도영상에 대한 신뢰도는 매질을 투사하기위하여 배치된 축선의 기하학적인 분포, 초동 주시 측정과정의 불확실성, 그리고 역산 모델링 방법의 정확성 및 타당성 등을 분석함으로써 평가 할 수 있다. 일반적으로 시추공 토모그래피의 측정

설치는 시추공 내에 제한되므로 축선의 기하학적 배치 방법에 따른 결과 영상의 분해능 증진에는 한계가 있다.

초기 속도모델은 탐사구간의 지질정보를 참작하여 단순구조 모델(상속도)을 선정하는 경우가 많다. 따라서 한 역산법을 사용하여 생성된 속도 토모그램에 표출된 속도 이상대에 대한 신뢰도는 상당 부분 초동주시 측정의 정확도에 상관된다고 할 수 있다. 주시측정의 정확도는 수신된 초동신호의 질, 즉 신호 대잡음비(S/N)와 직접적인 관계가 있다. 이 논문에서는 초동신호의 측정오차로 제어하는 주시 토모그래피법을 제안하고 실제 공대공 탄성과 자료에 적용하는 실험을 통하여 이 방법의 적용성에 대한 연구를 수행하였다. 측정오차는 초동 신호의 신호대잡음비(S/N) 및 주파수 대역의 함수로 표시되는 산출 방법을 사용하였다(이두성, 2007a).

이 연구에서 사용한 역산방법은 측정주시와 모델주시 차를 최소화하는 방향으로 속도모델을 반복적으로 수정하는 역산방

2009년 7월 13일 접수; 2009년 8월 17일 채택

*Corresponding author

E-mail: dslee@hansung.ac.kr

Address: Information System Engineering, Hansung University,
Samsun-dong, Sungbuk-gu, Seoul, Korea

법이다. 적용실험에서는 제안한 역산 방법의 적용 시 각 반복 단계에서 표출된 모든 기록의 주시 차 분포, 주시 차와 측정오차와의 상관관계, 최종 속도영상에서 표출된 속도 이상대의 크기와 토모그래피의 분해능 등의 분석을 통하여 제안한 역산 방법에 대한 성능 분석을 시도하였다.

제어 주시토모그래피

주시토모그래피에서 속도모델은 다수의 상속도 속도격자로 구성되며, 모델주시는 속도모델 상에서 파선추적을 통하여 탐사 측선에 해당하는 파선을 도출하고 그 파선 상에 존재하는 모든 속도격자의 구간별 주시의 합으로 산출한다. 모델주시를 산출하는 주시 토모그래피의 정 모델링(forward modeling) 시스템은 다음과 같다.

$$t = Ls \tag{1}$$

M개의 속도격자로 구성된 속도모델의 경우 식 (1)에서 L은 모든 파선(N개)의 속도격자 구간 길이를 요소로 한 N×M 행렬이다.

반복 역산방법에서 측정주시와 모델주시 차는 사용한 모델에서의 파선경로(L)가 실측기록의 파선경로(L₀)와 비슷하다는 가정으로 다음과 같은 선형시스템으로 표시된다.

$$\Delta t = t_{obs} - t_{cal} \cong L_0 \Delta s \tag{2}$$

식 (2)로부터 속도모델 개선 공정은 다음과 같은 반복 역산 공식을 사용하여 수행할 수 있다(Berryman, 1991). 이 연구에서는 식 (2)의 근사해법으로 SIRT알고리즘을 사용했다. 속도격자 j에서 역속도 증분은 다음의 공식으로 계산한다(Dines and Lyttle, 1979).

$$\Delta s_j = N_{jj}^{-1} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta t_i l_{ij}}{\sum_{q=1}^M l_{iq}^2} \tag{3}$$

여기서 l_{ij}는 격자 j 구간의 파선 i의 길이이고 N_{jj}는 격자 j를 지나는 모든 파선의 수이다.

식 (3)에서 역속도 증분 Δs는 이론적 모델링 즉 파선추적과 주시 차 Δt의 함수이다. 이론적 모델링 방법이 탐사법의 분해능 관점에서 충분히 정확하다고 가정하면 역속도 증분에 대한 신뢰도는 측정 주시의 오차분석을 통하여 평가할 수 있다. 모델링방법에 대한 논의는 이 연구 범위에 속하지 않는다. 초동 측정 주시의 오차는 초동 인식의 불확실성의 척도이다. 오차한계 즉 최대오차는 기록 중에서 초동신호의 존재를 판단하는데 필요한 데이터의 길이로 계량화 할 수 있으며 이 길이는 초동신호의 S/N의 함수이다. 신호가 일정 대역폭을 가지며 잡음이 백색잡음일 경우 Aki와 Richards (1980)는 초동신호를 인식하는데 필요한 데이터의 길이를 다음과 같이 제시하였다.

$$\Delta t = \frac{1}{W \log_2 \left(\frac{S^2 + N^2}{N^2} \right)} \text{(sec)} \tag{4}$$

이 논문에서는 초동주시 측정오차를 Δt로 계량화하였다. Δt를 산출할 때 주파수 대역폭 W는 기록의 진폭 스펙트럼을 관찰하여 유효신호가 우세한 구간으로 정하고, S/N값은 기록의 시작(0시)부터 초동 전까지의 구간을 잡음 n(t)로 기록의 시작부터 초동신호가 충분히 포함 될 수 있는 구간의 기록을 s(t) + n(t)로 가정하여, 두 구간의 진폭 스펙트럼에서 최대 진폭의 비로 (S+N)/N을 산출하였다(이두성, 2007a).

식 (3)에서 측정주시에 대한 신뢰도는 산출된 속도모델의 신뢰도와 직접적인 관계가 있다는 사실에 기초하여 측정주시 오차를 매개변수로 하는 역산 방법을 제안하였다. 이 역산은 모든 기록의 주시를 역산에 사용하는 대신 신뢰할 수 있는 기록의 주시만을 사용하는 방법이다. 측정오차에 근거한 기록 선택의 기준은 도출하고자하는 속도영상의 분해능을 참조하여 설정할 수 있다. 즉, 탐지하고자하는 속도 이상대의 크기와 기록의 주파수 특성 등을 고려하여 최대 허용 오차한계를 설정하고, 측정오차가 이 오차한계 보다 큰 기록은 1차적으로 역산 과정에서 제외한다. 2차적으로 고려할 사항은 반복역산의 각 단계에서 산출되는 주시 차를 참조한 기록 선택에 관한 사항이다. 반복역산의 각 단계에서 산출된 주시차가 해당 기록의 측정오차 보다 작은 경우의 주시 차는 측정주시의 분해능 측면에서 보면 상대적으로 신뢰도가 떨어지므로 영(零) 또는 감쇄 처리한다. 이는 무의미하게 작은 주시 차가 누적되어 속도모델 개선에 기여함을 방지 또는 억제하는 처리이다.

실험 결과

제안한 역산 방법의 성능분석을 위하여 역산 방법을 적용할 때 각 반복단계에서 표출되는 모든 기록의 주시 차 분포, 역산

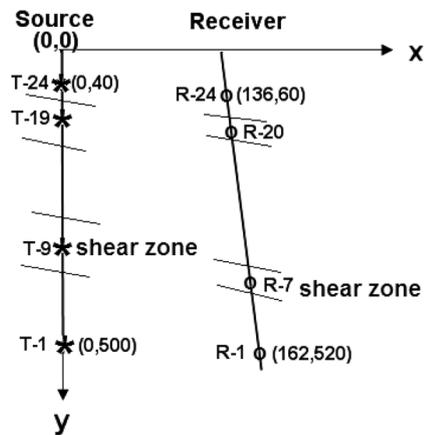


Fig. 1. Source and receiver geometry for the crosswell survey. Coordinates in the figure is in cm (Lee, 2006).

이 진행함에 따라 나타나는 주시 차 변화 거동과 측정오차와의 상관관계, 최종 속도영상에서 표출된 속도 이상대의 크기와 토모그래피의 분해능 등의 분석을 수행하였다. 적용실험에 사용한 자료는 화강암지역에서 획득한 소규모 고주파 시추공 탄성파 자료로서 송신원의 우세 주파수가 40 kHz인 기록이다. 자료획득 매개변수로는 시추공 간격이 대략 1.5 m, 탐사구간이 4.6 m, 송신 및 수신점 간격은 모두 0.2 m 이다. Fig. 1에서 T-1, T-24, R-1, R-24 등은 각각 송신점 1과 24 수신점 1과 24 등을 표시한다. 기록의 시간 샘플간격은 4 μ s 이고 길이는 1024 샘플이다. 이 자료는 탄성파 탐사에 의한 전단대 탐지 가능성을 규명하기 위한 실험 목적으로 획득한 다중 주파수 기록의 일부이다. 이 탐사 자료를 사용한 연구로는 이두성(2006, 2007a, 2007b)이 있다.

초동 측정오차

모든 기록의 초동을 발체하고(Fig. 2a), 초동 측정오차를 식 (4)를 사용하여 산출하고 그 결과를 Fig. 2b에 도시하였다.

Fig. 2에 도시한 등고선의 수치 단위는 기록의 샘플간격 (4 μ s)이다. 오차는 모든 기록에서 W 를 26 kHz로 하여 산출하였다. 식 (4)에서 보면 측정오차는 S/N 보다 W 에 더 민감하게 반응하므로 W 의 선정에 주의를 할 필요가 있다. 측정오차는 대체로 파선 길이의 증가에 따라 증가함을 볼 수 있다. 여기서 최대 측정오차는 30 샘플(120 μ s)이다. 일반적으로 파형 신호의 이벤트 측정의 분해능은 대략 1/4 파장으로 추정한다. 측정된 기록의 최대 유효 주파수를 26 kHz라 하면 파형의 최소 파장은 대략 40 μ s이며 잡음의 영향이 매우 작은 경우($S/N \gg 1$) 초동주시 측정오차는 대략 10 μ s 이하로 추정할 수 있다. 초동 신호의 파장은 전파거리 R 의 제곱근(\sqrt{R})에 비례하므로 원거리 기록의 측정오차는 근거리 기록의 오차보다 상대적으로 클 것이다. 여기서 사용한 자료의 경우 전파거리는 근거리와 원거리가 각각 1.4 m와 5 m임을 고려할 때 S/N 의 영향을 무시하면 원거리 기록의 측정오차는 근거리기록 오차의 1.9($\approx \sqrt{5/1.4}$) 배로 대략 20 μ s으로 추정할 수 있다. 따라서 1/4파장 공식에 의하면 근거리 기록 중 오차가 3샘플이하인 기록과 원거리 기록 중 오차가 5샘플 이하인 기록 들은 잡음의 영향이 무시할 정도로 작은($S/N \gg 1$) 기록들로 판단된다. Fig. 2b에 도시된 측

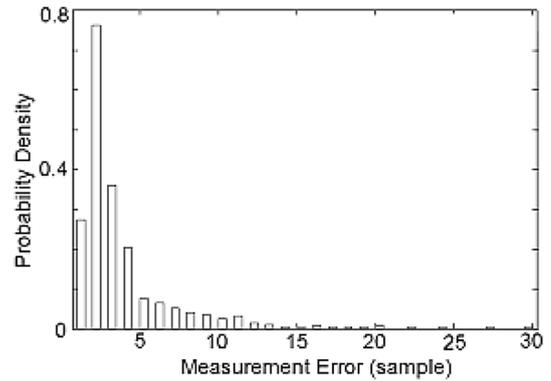


Fig. 3. Distribution of the measurement error.

정오차의 분포를 관찰할 때 오차가 6 이상인 기록들은 대부분 원거리 기록들이며 이 기록들은 잡음의 영향이 비교적 큰 기록들로 판단된다. Fig. 3에 산출한 측정오차의 확률밀도를 도시하였다.

여기서 보면 대부분의 기록에서 측정오차가 5이하이고 오차가 15이상인 소수의 특이 값(outlier)들이 존재한다. 측정된 모든 기록의 초동을 역산에 사용할 경우 이 소수의 특이 값들이 역산결과에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Tarantola (1987)의 이론을 참조한다. Tarantola는 역산문제의 해를 정의하는데 있어서 다음과 같이 확률밀도 함수로 표시하였다.

$$\sigma(d, m) = \frac{\rho(d, m) \theta(d, m)}{\mu(d, m)} \tag{5}$$

여기서 보면 사후정보 $\sigma(d, m)$ 은 측정자료, 모델에 대한 사전정보, 이론적 모델링의 함수로 표시하였다. 사전정보 $\rho(d, m)$ 은 측정자료 d 와 모델 m 에 대한 사전정보로부터 도출되는 정보로서 일반적으로 모델과 자료의 결합공간 $D \times M$ 에서 정의되고, 이론적 확률밀도 $\theta(d, m)$ 은 주어진 모델 m 을 사용한 모델링 결과와 측정 자료 d 의 상관으로부터 도출되는 정보이고, $\mu(d, m)$ 은 영 정보(null information) 상태를 나타낸다.

측정자료 즉 획득한 초동주시가 속도 모델 매개변수에 독립적이라면 $\rho(d, m) = \rho_D(d) \rho_M(m)$ 이 된다. 그리고 주어진 모델에 대한 이론적 모델링 즉 파선추적에 의하여 산출된 모델 주시에 오차가 없다면 사후정보 $\sigma(d, m)$ 은 주로 $\rho_D(d)$ 의 함수이다. 본 문제에서 $\rho_D(d)$ 는 측정을 통하여 도출될 수 있는 오차가 없는 정확한 초동주시에 대한 확률밀도 함수이다. 따라서 측정오차가 역산결과에 미치는 영향은 함수 $\rho_D(d)$ 를 통하여 분석할 수 있다. 확률밀도 $\rho_D(d)$ 는 모델 가설에 따라 차이가 있으나 오차가 독립적일 경우 일반적으로 사용하는 가우시안 가설인 경우는 다음과 같이 정의한다.

$$\rho_D(d^1, d^2, \dots) = \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_i^N \frac{(d^i - d_{obs}^i)^2}{\sigma^2} \right] \tag{6}$$

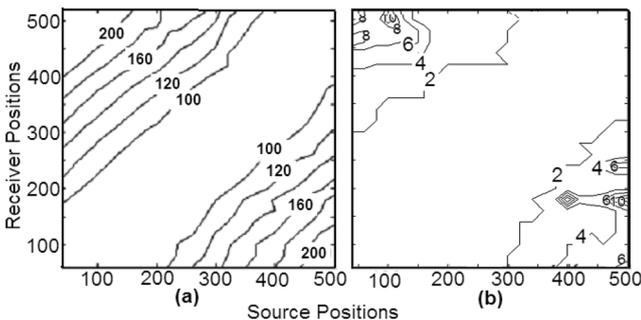


Fig. 2. Picked first breaks (a) and the picking errors (b).

Fig. 3에 도시한 오차분포의 평균값은 3.64이고 분산은 12.27이다. 이 분포를 식 (6)을 통하여 해석하면 측정오차가 적은 다수의 기록들에 비하여 소수의 특이 값들의 영향이 역산 결과에 지배적인 사실을 알 수 있다. 따라서 모든 기록을 역산에 사용하는 것은 신뢰도가 낮은 기록들에 의하여 지배되는 역산 결과를 도출하는 것과 같다고 판단할 수 있다.

속도역산

주시 토모그래피의 공간분해능은 수직방향에 대략 신호파장의 1/4이고 수평방향 분해능은 $\gamma_{min} = (l\lambda)^{1/2}$ 이다(Sheriff and Geldart, 1985). 여기서 l 은 파선의 길이이고 λ 는 파장이다. 수평분해능을 결정하는 요소는 측정 초동신호의 주파수와 탐사구간을 투사한 파선들의 길이 즉 시추공간 거리와 시추공의 깊이 등이다. 본 토모그래피의 경우 초동신호의 최대 주파수를 26 kHz로 하고 매질의 속도를 5 km/sec로 하면 최소파장은 19 cm이다. 따라서 본 토모그래피의 획득 가능한 수직분해능은 4.8 cm 이상이고 수평분해능의 경우 파선의 최소 길이를 시추공사이 거리 150 cm로 하면 54 cm 이상이 된다. 잡음의 존재로 인한 측정오차가 탐사법의 공간 분해능에 미치는 영향에 대한 분석은 Krajewski *et al.* (1989)이 제시한 이론을 참조할 수 있다. 주시토모그래피 탐사법으로 탐지 가능한 속도이상대의 최저 크기는 이상대의 존재로 인한 주시의 지연과 초동주시 측정오차에 의하여 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\gamma_{min} = \Delta t \cdot v_a \cdot v_b / |v_a - v_b| \tag{7}$$

여기서 v_a 와 v_b 는 각각 배경과 이상대의 속도이고 Δt 는 초동 측정 오차이다. 기존의 연구(이두성, 2007b)에 의하면 10 kHz 신호에 의한 탄성파의 전단대에서 속도는 주위매질의 속도보다 대략 10% 정도 적은 것으로 분석되었다. 이 경우 50 cm 정도의 분해능을 얻기 위해서는 Δt 는 3샘플 이하 이어야한다. 사용한 자료에서 산출된 측정오차가 6샘플(24 μs) 이상인 기록은 총 576 기록 중 92개이며 이 기록들은 주행거리가 상대적으로 긴 원거리 기록 들이다(Fig. 2b).

주시토모그래피의 초기 속도모델은 음파검층 시추 코어분석 등 사전정보에 의하여 작성하는데 여기서는 모든 기록에서 초동주시와 진원-수신기 사이의 거리로부터 산출한 매질의 평균 속도(5 km/sec)를 속도로 하는 상속도 초기모델을 채택하였다.

역산 과정에서 사용한 모델주시는 유한차분법(FD)으로 산출하였다(van Trier and Symes, 1991; Vidale, 1990). 유한차분 격자 크기는 유한차분법의 격자분산을 억제하고 일치성(consistency)이나 수렴(convergence)을 고려하면 격자의 크기는 최소파장보다 충분히 작아야하나 사용가능한 데이터 수 등을 고려하여 상속도 격자의 크기를 10×10 cm로 설정하였다. 사용한 속도모델은 크기가 170×480 cm로 이 역산에서 정의해야할 파라미터 수는 816개이고 사용할 데이터 즉 초동주시는 576개로 이 경우 파라미터의 고유해는 underdetermined 문제로 존

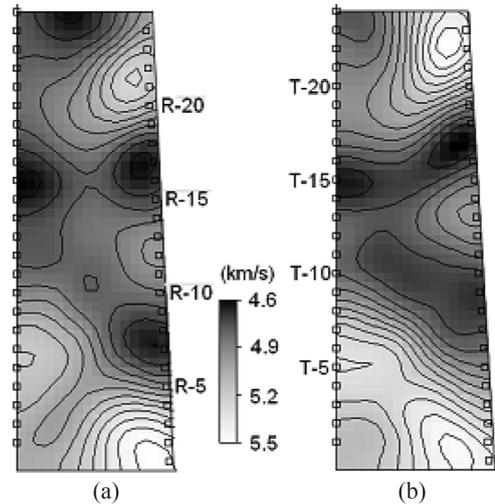


Fig. 4. Velocity tomograms generated by using all records (a), and using limited records (b).

재하지 않는다. 고유해 문제와 유한차분법의 안정성(stability)과 50 cm 정도의 분해능을 고려하여 반복역산의 각 단계에서 산출된 속도모델에 4×4 크기의 평균 마스크를 적용하여 속도 모델을 평활하게 하였다.

40회 반복 역산으로 도출한 속도영상을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4a의 영상은 모든 기록을 사용하여 도출한 속도영상이고 Fig. 4b는 제어 역산 결과이다. 측정오차 정보를 사용한 제어 역산에 의한 영상은 시추공 사이로 연속성이 양호한 저속도구간(T-15~R-18과 T-13~R-10)을 표출하는데 비하여 Fig. 4a 영상에서는 시추공간으로 연속성이 의심되는 3개의 비교적 뚜렷한 저속도 이상대가 T-15, R-18, R-8 부근에 형성되고 있다. 본 제어역산에서는 측정오차가 5샘플 이하인 기록들만 사용하였다.

속도영상에 표출된 속도 이상대에 대한 신뢰도는 영역별로 차이가 있을 수 있다. 속도영상의 영역별 신뢰도는 그 부분을 통과하는 파선의 분포상태로 평가하는 것이 일반적이다. 즉 격자내의 파선들의 방위각이 넓은 범위에 분포하고 또한 다수의 파선들이 통과하는 부분이 그렇지 않은 부분보다 신뢰도가 높다고 할 수 있다(Berryman, 1991). 본 제어 역산에서 측정오차가 큰 기록들, 즉 원거리 기록들의 배제로 인한 방위각 분포의 감소로 수평방향 분해능의 저하를 생각할 수 있으나, 이들 기록을 포함하면 측정오차가 5 샘플에서 10샘플 이상으로 증가하게 되어 속도 영상에서 탐지 가능한 저속도(10%) 이상대의 크기는 각각 150 cm 이상이 예상된다. 따라서 Fig. 4a에 표출된 수평연장이 30 cm 정도의 불연속적인 저속도 이상대는 부정확한 초동주시를 포함한 역산과정에서 유입된 수치적 잡음으로 생각할 수 있다.

주시 차 분포

위의 역산 결과에 대한 주시 토모그래피의 기능적 측면의

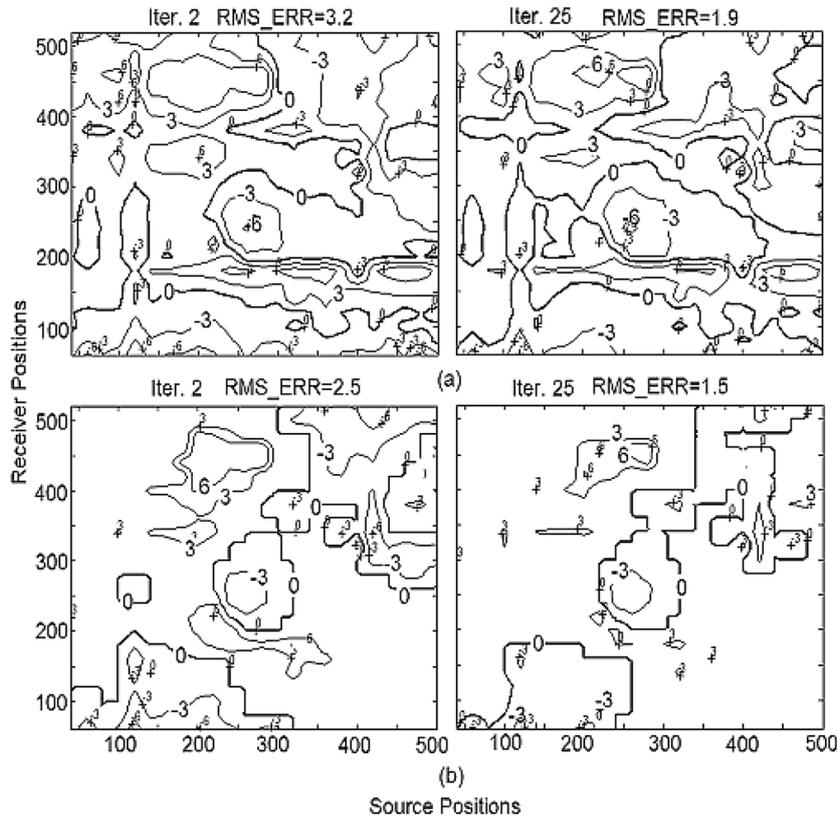


Fig. 5. Travel time residuals computed at the 2nd and 25th steps in the iterative inversion. (a) ordinary methods, and (b) the regulated method. The unit of contour values are recording sample ($4 \mu s$).

분석을 위하여 반복역산 각 단계에서 주시 차의 변화 거동을 관찰하고 두 속도영상의 2번째 단계와 25번째 단계에서 계산된 주시 차 분포를 도시하였다(Fig. 5). 여기서 주시 차는 식 (2)에 정의한 측정주시와 모델주시의 차($t_{obs}-t_{cal}$)이다. 상기 두 역산의 반복 과정에서 표출된 주시 차 분포는 공간적으로 각각 유사한 양상을 보인다. 즉 역산의 초기단계에서 형성된 주시차 등고선의 공간적 분포양상은 반복과정이 증가함에 따라 크게 변하지 않고 대부분의 기록에서 주시차가 점진적으로 감소하는 사실을 확인할 수 있었다. 제어역산의 2단계 주시 차 분포에서 보면 Fig. 5b의 왼쪽 윗부분과 오른쪽 아랫부분의 주시 차는 영으로 표시되었는데 이는 이 부분의 기록들(측정오차가 큰 기록)은 역산에서 제외되었음을 표시한다.

Fig. 2와 Fig. 5를 비교하여 측정오차가 4 이하인 기록들의 주시차를 관찰하면, 제어역산의 경우 주시 차는 현저히 감소한 반면, Fig. 5a 영상은 이 부근 기록의 주시차가 감소가 상대적으로 미약하고 측정오차가 큰 기록들의 주시 차 감소가 현저한 사실을 관찰할 수 있다. 이는 모든 기록을 사용할 경우 측정오차가 큰 기록 즉 신뢰도가 낮은 기록이 토모그램 생성에 지배적 영향을 줄 수 있다는 사실을 시사하며 제어역산이 이러한 문제점을 보완한 역산법이라고 생각할 수 있다.

반복역산의 각 단계에서 계산된 주시 차 분포는 도출되는 속도모델의 현실 가능성에 대한 정보를 제공한다. 도출한 속도

모델의 현실 가능성을 평가하는 수단으로 일명 최소 시간원리(principle of least time)라 칭하기도 하는 Fermat의 원리를 참조할 수 있다. Fermat의 원리에 의하면 공간상의 2점을 통과하는 광선(ray of light)의 파선궤적은 2점을 가장 빨리 통과하는 궤적이다. 따라서 초동신호의 측정주시는 해당 진원과 수신점을 통과하는 파선 중에서 가장 주행시간이 가장 빠른 궤적을 통과한 파선의 주시이다. 따라서 도출한 속도 모델이 실제 모델과 근사하다면 모델주시는 측정주시보다 작을 수 없다. 이 조건을 만족시키지 못하는 파선이 많을수록 도출된 모델의 현실 가능성은 낮아진다고 판단 할 수 있다. Fig. 5a에서는 주시차가 양(+인) 기록들이 Fig. 5b에 비하여 현저하게 많은 사실을 관찰할 수 있으며 따라서 Fermat의 원리를 참조하면 제어역산에 의한 속도모델이 상대적으로 현실 가능성이 크다고 판단할 수 있다.

결 론

여기서 제안한 역산법은 초동 측정오차 정보를 사용하여 측정기록을 선택적으로 역산과정에 사용하는 방법이다. 적용실험 결과 2가지 측면에서 제어역산의 효용성을 확인하였다. 첫째로 제어 역산에 의한 속도영상에서는 기존의 주시토모그램에서 흔히 볼 수 있는 수치잡음이 저하된 것을 관찰할 수 있

었고, 둘째로 Fermat 원리에 근거하면 제어 역산 결과 도출된 속도모델이 현실가능성이 높은 모델로 판단되었다.

여기서 제안한 제어역산 절차는 다음과 같다.

1. 모든 기록의 초동발체와 연계하여 측정오차를 산출한다.
2. 축선의 기하학적인 배치, 수신신호의 주파수 대역과 분석하고자하는 속도 이상대의 크기 등을 고려하여 초동측정 허용 오차한계를 산출한다.
3. 기록 중에서 측정오차가 허용오차 범위에 벗어나는 기록을 역산에서 제외한다.
4. 반복역산 각 단계에서 모델주시와 측정주시 차가 측정오차보다 작은 경우 그 주시차를 영으로 처리한다. 영으로 처리되는 기록은 동적처리로 매번 변할 수 있다.

제어 역산방법은 성취하고자하는 영상의 분해능에 기초하여 허용 오차한계를 산출하고, 기록의 측정오차에 근거하여 선택적으로 입력 자료를 사용하고, 또한 반복역산 과정에서 계산된 주시 차 중에서 분해능 이하의 주시 차를 영으로 처리함으로써 무의미한 수치가 누적되어 속도 개선에 유입함을 방지함으로써 역산의 수치잡음을 억제하며 보다 현실 가능한 속도영상을 도출할 수 있다고 생각된다.

사 사

이 연구는 2009년도 한성대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 이 기관에 감사한다.

참고문헌

- 이두성, 2006, 시추공간 전단대 특성 규명을 위한 고해상 탄성과 토모그래피, 물리탐사, **9**, 255-260.
- 이두성, 2007a, 초동발체를 위한 탄성과 신호분석연구, 물리탐사, **10**, 130-136.
- 이두성, 2007b, 다중 주파수 송신원에 의한 공동공 탄성과 실험, 물리탐사, **10**, 223-228.
- Aki, K. and Richards, P. G., 1980, *Quality of Seismological Data, Quantitative Seismology: Theory and Methods*, 576-580, W.H. Freeman and Company,
- Berryman, J. G., 1991, *Lecture Notes on Nonlinear Inversion and Tomography: I. Borehole Seismic Tomography*, Lawrence Livermore National Laboratory
- Dines, K. A. and Lyttle, R. J., 1979, Computerized geophysical tomography, *Proc. IEEE*, **67**, 1065-1073.
- 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.
- Sheriff, R. E. and Geldart, L. P., 1985, *Exploration Seismology v. II*, 39.
- Trantola, A., 1987, *Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*: Elsevier, **52**.
- von Trier, J. and W. W. Symes, 1991, Upwind finite-difference calculation of traveltimes, *Geophysics* **56**, 812-821.
- Vidale, J. E., 1990, Finite-difference calculation of travel time in 3-D, *Geophysics* **55**, 521-526.