

시추공 탄성과 초동주시 기록의 정보정 연구

이두성*

한성대학교 정보시스템공학과

A Study on the Static Correction for the First Arrival Travel-time of the Cross-well Seismic Data

Doo Sung Lee*

Information System Engineering, Hansung University

요약: 시추공 탄성과 초동주시에 유입될 수 있는 잡음 중에서 주시토모그래피 결과에 심각한 영향을 미치는 체계적인 잡음인 송신원 종속적인 잡음과 수신점 종속적인 잡음을 해당기록의 정보정으로 산출하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 공통 송신원 또는 공통 수신점 모음의 초동주시를 적합 하는 최소제곱근사 곡선으로부터 해당 송신점 또는 수신점 종속적인 정보정을 산출하는 방법이다. 제안한 방법의 적용성을 검토하기위하여 잡음제거 모의실험을 수행하였다. 대상 모델로 균질한 매질 내에 있는 소규모 터널모델을 설정하고, 파선추적법에 의하여 주어진 축선배열에 대한 초동주시를 산출하고 이 기록에 송신/수신점 종속적인 잡음을 첨가하고 이를 산출하는 실험을 수행하였다. 잡음의 rms가 이상대의 존재로 인한 최대 예상 주시지연의 25%인 경우, 제안한 방법을 7회 반복 시행함으로써 성공적으로 잡음을 추출할 수 있었다.

주요어: 주시 토모그래피, 주시잡음, 정보정

Abstract: A method to evaluate and to reduce the source- and receiver- consistent noise in a cross-well travel time data was proposed. These systematic noises, which can cause some serious effects on the result of a travel time tomography, can be considered as the source and receiver statics. The method evaluates the statics through a curve-fitting of the first arrival travel times in the common source and common receiver gathers. Feasibility study was conducted on a synthetic data which simulates the cross-well travel time tomography to detect a small scale tunnel in a uniform background medium. First arrival travel times at a given source and receiver points are computed by a raytracing method, and the source consistent- and receiver consistent noises are added to the record. In case of the added noise with rms amounting to 25% of the maximum expected anomalous travel time delays, it is confirmed that the method successfully extracted the noise at the 7th step of iteration.

Keywords: travel time tomography, travel time noise, statics

서 론

시추공을 이용하는 탄성과 주시 토모그래피로 소규모 이상대를 탐지하려면 이상대의 존재로 인한 초동주시 공간의 변위에 대한 높은 신뢰도가 확보되어야 한다. 소규모터널 탐지를 위한 주시토모그래피 모의실험 결과에 의하면 송신 또는 수신기 종속적인 주시오차(잡음)가 이상대의 존재로 인한 주시 변위의 대략 25%인 경우 속도영상에서 터널의 위치를 인지하는데 불확실성이 높은 것으로 분석되었다. 특히 경암 내에 존재

하는 소규모 터널의 경우 예상되는 주시지연이 탄성과기록의 초동주시의 1~2% 퍼센트 정도로 미세함으로 기록에 첨가된 미세한 잡음도 토모그래피 결과에 심각한 영향을 미칠 수 있다(이두성, 2011).

본 논문에서는 주시토모그래피 초동주시 영역에 첨가된 잡음 중에서 토모그래피 결과에 심각한 영향을 미치는 체계적인 잡음, 즉 송신점, 수신점 종속적인 잡음을 도출하는 방법을 제안하고 모의실험을 통하여 그 방법의 적용성에 대한 평가를 수행하였다. 여기서 잡음은 시추공 탄성과 자료 획득과정과 초동 발체단계에서 유입된 잡음 즉 정보정(static)으로 고려하였으며, 제안한 잡음도출 방법은 그 절차와 적용법에 있어서 탄성과 반사법 잔여 정보정(residual statics) 처리방법을 참조하여 개발되었다.

논문에서는 적용성 검토를 위한 시추공 주시 토모그래피 모

2011년 3월 11일 접수; 2011년 4월 8일 수정; 2011년 4월 22일 채택
*Corresponding author

E-mail: dslee@hansung.ac.kr

Address: Information System Engineering, Hansung University,
Samsun-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-792, Korea

의실험을 수행하였다. 실험은 균질한 매질 내에 존재하는 소규모 터널 탐지를 목적으로 한 시추공 주시토모그래피이다. 설정된 속도모델 상에서 유한차분법에 기반한 파선추적을 통하여 각 송신/수신점에 해당하는 기록의 초동주시를 산출하고, 산출된 초동주시 기록에 송신점 또는 수신점에 종속적인 무작위 잡음을 첨가하고, 제안한 방법으로 잡음이 첨가된 기록으로부터 잡음을 도출하는 실험을 수행하였다. 파선추적은 유한차분법에 기초한 von Trier and Symes (1991)가 제안한 방법을 사용하였다.

잡음분석 및 산출

초동주시에 유입될 수 있는 잡음은 그 특성에 따라 측정과 상관되는 송신점 종속적인 잡음(source consistent noise)과 수신점 종속적인 잡음(receiver consistent noise), 그리고 무작위 잡음(random noise) 등으로 분류할 수 있다. 여기서 잡음이란 초동주시 발체과정에서 유입된 오차도 포함한다. 측점에 종속적인 잡음은 반사법 자료처리의 위치 종속적인 정보정(surface consistent statics)과 유사한 개념으로 생각할 수 있다. 본 논문에서 송신/수신점 종속적인 잡음은 송신/수신점 종속적인 정보정과 동일한 의미를 갖는다. 무작위 잡음(random noise)은 측정점의 위치에 상관되지 않고 개별 트레이스에 첨가된 잡음으로 모의실험결과에 의하면 토모그래피 속도영상에 미치는 영향은 송신/수신점 종속적 잡음에 비하여 현저하게 적은 것으로 분석되었다(이두성, 2011). 기록의 신호 대 잡음 비(S/N)가 불량하여 초동 발체과정에서 유입되는 오류는 무작위 잡음으로 고려될 수 있으며 이러한 오류는 근본적으로 치료가 불가하여 토모그래피 공정에서 해당기록 사용을 제한하는 방법이 안전할 것이다(이두성, 2009).

시추공탐사 기록에 유입되는 송신/수신점 종속적인 잡음의 원인은 송신원과 수신점 위치설정 오차와 기기작동 오류로 생각할 수 있다. 기기작동 오류는 기록상 송신원의 시작시간(triggering time)과 실제 에너지가 매질에 전파된 시간과의 차이를 생각할 수 있다(이두성, 2003). 현재 사용되는 시추공 탐사는 일정 구간에 다중채널 수신기를 설치하고 송신원을 일정 간격으로 이동하며 자료를 획득하는 방법이다. 따라서 송신원 위치설정은 수신점 위치설정보다 불확실성이 높다. 그리고 자료가 공통 송신점 모음 형태로 획득될 경우 송신점에 종속적인 잡음은 시각적으로 자료획득 현장에서 인식하기가 매우 어렵다. 송신점 종속적인 잡음 즉 송신점 간의 불규칙한 시간편차는 공통 수신점 모음에서는 시각적 확인이 가능하다.

본 연구에서 송신/수신점 종속적인 잡음 추출은 공통 송신점 기록(common source gather: CSG)과 공통 수신점 기록(common receiver gather: CRG)에서 기록의 오프셋에 대한 초동주시 곡선(무브아웃 곡선)은 기록 구간에서 매질 속도 변화가 크지 않을 경우 쌍곡선으로 근사할 수 있다는 사실에 기반

을 둔다. 기록에 첨가된 미지의 잡음에 대한 분석방법으로 탄성과 반사법 자료처리 공정 중 하나인 잔여 정보정(residual statics correction) 개념을 도입하였다.

시추공 탄성과 자료에서 공통 송신원 기록의 초동주시는 제한된 구간에서 다음의 쌍곡선 식으로 표시할 수 있다.

$$T(z) = \sqrt{(x^2 + z^2)}/a \tag{1}$$

여기서 x 는 시추공 간격이고 z 는 송신점과 수신점의 수직거리(오프셋)이며 a 는 구간 매질의 평균 속도이다. 시추공 간격이 일정하면 모든 공통 송신원 기록의 초동주시는 식 (1)의 곡선 상에 있을 것이며 만일 특정 기록이 식 (1)에서 벗어나 다음과 같은 곡선 상에 있다면,

$$T(z) = \sqrt{(x^2 + z^2)}/a + b \tag{2}$$

식 (2)에서 b 는 해당 송신원의 정보정 즉 삽입된 잡음으로 볼 수 있다. 여기서 제안한 잡음 추출 즉 시추공 자료 정보정 처리는 그 원리나 절차에 있어서 탄성과 반사법 자료처리의 잔여정보정과 비슷한 면이 있다. 시추공 주시 정보정 방법과 반사법 잔여 정보정 방법을 비교해보면, 반사법 잔여 정보정 산출과정은 CMP 모음에서 속도분석으로 도출한 속도로 각 트레이스를 무브아웃 보정(moveout correction)하고 중합한 트레이스와 모델 트레이스와 닮음(semblance) 처리를 통하여 CMP 정보정 값들을 산출한다. 여기서 산출된 정보정 값들은 송신 정보정과 수신 정보정의 합이므로 이들 CMP 정보정 값들로부터 역산을 통하여 송신 종속적인 정보정 값과 수신 종속적인 정보정 값을 산출한다(Wiggins *et al.*, 1976).

시추공 자료의 경우 CSG와 CRG 모음의 초동주시에 적합한 식 (2)에 정의된 쌍곡선을 도출하고 쌍곡선의 영 오프셋 시간(zero-offset time)의 상대적인 편차를 각각 송신 종속적 수신 종속적 정보정으로 산출한다. 본 논문에서 사용한 곡선맞춤은 최소제곱근사(least square approximation)법으로 이 경우 주의할 사안은 이상점(outlier)의 처리이다. 최소제곱근사 맞춤에서 소수의 이상점의 존재는 곡선맞춤에 큰 영향을 미친다. 따라서 한 CSG/CRG 기록 중에서 맞춤곡선에서 많이 벗어나는 기록(outlier)들은 특정 송신/수신점 종속적인 잡음이거나 또는 매질의 속도 이상에 관련되었을 경우가 있으므로 이러한 이상점들은 곡선맞춤에서 제외하는 것이 바람직하다. 실제 자료처리는 전산처리 이므로 이상점을 시각적으로 판단할 수 없다. 따라서 일차 곡선맞춤으로 개략적인 근사 곡선을 도출하고 이 곡선과 실측 초동주시의 잔차(residual)분포를 참조하여 이상점을 선별한다. 선택된 이상점들을 제외한 이차 곡선 맞춤에서 정보정 값을 산출한다.

반사법의 속도분석은 반사 이벤트들과 잘 맞는 근사 쌍곡선들을 찾는 공정이다. 시추공 자료에서 곡선맞춤은 반사법의 속도분석에 해당하고, 닮음처리로 정보정 값을 산출하는 부분은 이상점을 제외한 이차 곡선 맞춤으로 도출 곡선의 신뢰도가

증진된 상태에서 영 오프셋 시간을 도출하는 공정과 대비된다.

두 정보정의 차이점은 곡선 맞춤에서 반사법은 양방향(2-way) 주시를 사용하는데 시추공은 한 방향 주시를 사용하고, 시추공자료에서는 송신/수신 개별치리로 반사법에서 필요한 역산과정이 불필요하고, 반사법의 경우 정보정 효과는 중합단면에서 이벤트들의 연속성 증진으로 표출되므로 단계별 정보정 효과를 시각적으로 쉽게 판단할 수 있는데 반하여 시추공 주시토포그래피의 경우는 단지 발췌된 초동만 사용함으로써 실제 초동기록에서 정보정 효과의 시각적인 평가는 쉽지 않은 면이 있다.

시추공 주시 정보정 알고리즘

시추공 자료 정보정은 CSG와 CRG 모음에서 쌍곡선 맞춤으로 산출한 영 오프셋 시간(zero-offset time)의 상대적인 편차를 정보정으로 도출한다. 곡선 맞춤에서 이상점의 영향을 억제하기 위하여 곡선맞춤은 2 단계로 실시한다. 1 단계 곡선맞춤에서 곡선과 실측 초동주시와 차이인 주시잔차 분포를 산출하고 잔차가 분포의 평균값으로부터 특정 범위(예를 들면 표준편차) 밖에 있는 기록을 이상점으로 선별하고, 2 단계 곡선 맞춤에서는 선별한 이상점들을 제외시킨다. 이 방법은 반복적으로 수행할 수 있다. 반복적 정보정 산출 과정에서 단계별 속도의 변화가 적고 정보정 증진이 안정적으로 영(0)으로 수렴하면 도출된 정보정에 대한 신뢰도가 높다고 생각된다.

본 실험에서 사용한 곡선맞춤에 의한 반복적인 정보정 산출 알고리즘의 의사코드는 다음과 같다.

```
// Curve Fitting
// (v, δt, fitmeasure) = curve_fit(T, vmax, vmin, δtmax)
// Input:
T: 공통모음 기록의 초동주시
vmax, vmin: 곡선 맞춤의 허용 최대, 최소 속도(식 (2)의 매개변수 a의 범위)
δtmax: 최대 예상 정보정(식 (2)의 매개변수 b)

//output:
v, δt: 맞춤속도와 산출된 정보정
fitmeasure: 맞춤 신뢰도
//Compute statics
// Input:
Thold: 반복계산 임계값
// Compute source or receiver statics
do = 1 : Nshot or Mreceiver
Flag =TRUE
Ti: i번째 shot 또는 receiver 공통모음 기록의 초동주시 배열
Δt(i) = 0.
```

```
while(flag)
```

```
(v, δt, fit) = curve_fit(Ti, vmax, vmin, δtmax)
```

```
Δt(i) = Δt(i) + δt
```

```
Ratio = |δt| / |Δti|
```

```
if (Ratio < Thold) flag = FALSE
```

```
shot_static(i) or receiver_static(i) = Δt(i)
```

```
end do
```

모의실험

터널모델에 대한 파선추적에 의하여 산출된 초동기록(synthetic record)에 두 개의 난수로 표시되는 잡음을 첨가한다. 이 공정을 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$T_N(i, j) = T_o(i, j) + N_s(i) + N_r(j) \quad (3)$$

여기서 i, j 는 각각 송신 수신점 번호이고 T_N 과 T_o 는 각각 잡음이 첨가된 기록과 잡음이 없는 초동주시 기록이고, N_s 와 N_r 은 각각 송신원 종속 잡음과 수신점 종속 잡음이다. 잡음은 각각 송신점 수와 수신점 수와 동일한 두 개의 난수 분포를 생성하고 각각 분포의 평균값을 영으로 표준편차를 최대예상 정보정 값과 동일한 수준이 되게 조절하였다.

실험할 터널모델을 Fig. 1에 도시하였다. 여기서 모델의 배경속도는 5,000 m/s 이고 시추공간격은 19.5 m 이고 터널의 크기는 2 m × 2 m이다.

기존의 연구결과(이두성, 2011)에 의하면, 이 모델에서 터널의 존재로 인한 초동주시기록에 표출된 최대 주시지연은 0.045 ms이며, 송신점 또는 수신점 종속적인 잡음의 크기가 최대 주시지연의 25% (≈ 0.01 ms) 이상일 경우 도출된 속도영상에서 터널의 위치를 인식하는데 어려움이 있음을 확인하였다. 이 모델의 경우 0.01 ms은 파선길이 5 cm 정도에 해당하는 오차이며 이는 송신원 간격 1 m 정도인 기록에서 특히 수작업으로 송신원을 이동시키는 탐사에서는 충분히 예상되는 수준의 오차이다. 따라서 이러한 탐사목적 달성을 위해서는 잡음 수준

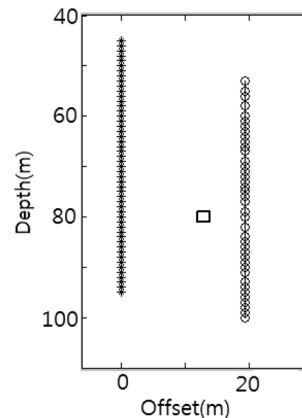


Fig. 1. The source and receiver layout.

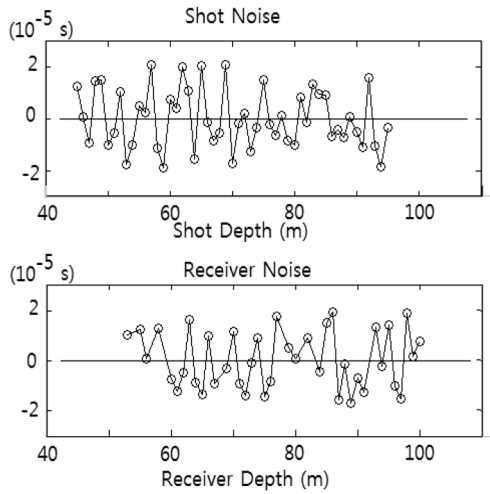


Fig. 2. The source and receiver consistent noises are constructed by a random number generator. The mean of the noise distribution is zero, and the rms amplitude of the noise is 25% of the maximum expected anomalous travel time delay caused by the existence of the tunnel.

을 낮추는 전처리과정이 성공적인 주시토모그래피 탐사에 필요할 것으로 판단된다.

실험에 사용한 송신/수신기 종속적 잡음은 무작위 잡음으로 그 rms 크기가 최대 주시지연의 25% 정도이다 (Fig. 2).

잡음추출

Fig. 2의 잡음을 터널모델 초동주시 기록에 첨가하고 그 기록으로부터 송신원 종속적인 잡음과 수신점 종속적인 잡음 산출을 시도하였다. 송신원 정보정과 수신점 정보정은 각각 공통 송신점 기록(CSG)과 공통수신점 기록(CRG)에서 독립적으로 처리하였다. 정보정 산출은 2 단계의 곡선맞춤으로 구성된다. Fig. 3에 깊이 80 m에 위치한 송신원 기록의 처리과정을 도시

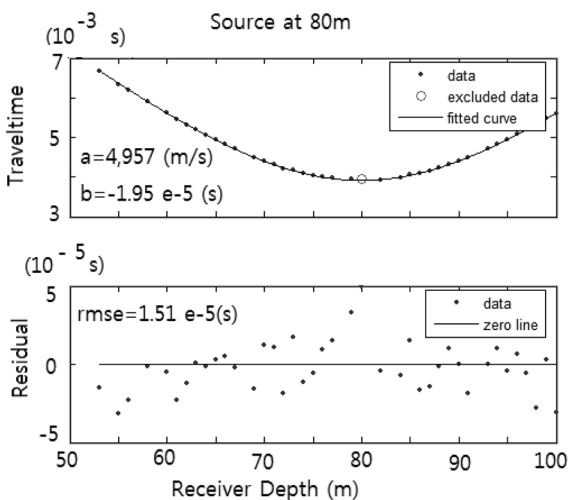


Fig. 3. Curve fitting for the first arrival travel times of the record with the shot at depth of 80 m.

하였다.

Fig. 3의 윗부분 도표에서 곡선 맞춤(curve fitting)에 사용한 초동기록들은 점으로, 도출된 곡선은 실선으로 표시하였고, 곡선 맞춤정도의 척도인 곡선과 기록과의 잔차(residual)는 점으로 Fig. 3의 아랫부분에 표시하였다. 이 모델은 배경속도가 균질함으로 한 공통 송신원 모음에 속한 모든 초동주시에 대하여 동일한 속도(식 (1)의 매개변수 a)를 사용할 수 있으나 실제 데이터의 경우 깊이에 따른 속도변화 가능성을 고려하여 곡선 맞춤구간을 제한하는 것이 필요할 수도 있다. 그리고 상향 굴절과가 초동으로 수신되는 경우가 있으므로 일반적으로 수평방향의 파선은 사용을 제한한다. 곡선 맞춤의 주의사항은 사전정보를 사용하여 속도범위와 최대 잡음한계를 설정한 후 곡선맞춤을 시도하는 것이 바람직하다. 이 실험에서는 속도(a)의 범위를 4500 ~ 5500 (m/s)으로 하고 최대 잡음(b)을 ± 0.02 ms으로 하였다. Fig. 3에 표시된 처리결과는 매질의 속도를 4,957 m/s, 정보정은 0.0195 ms으로 산출되었음을 표시한다. 곡선 맞춤과정에서 매트랩 곡선맞춤 함수를 사용하였다 (Matlab7, Curve Fitting Toolbox).

곡선맞춤 과정에서 주의할 사항은 이상점(outlier)의 처리이다. 한 CSG 기록 중에서 맞춤곡선에서 많이 벗어나는 기록들은 곡선맞춤에서 제외하는 것이 바람직하다. 곡선 맞춤에서 제외된 이상점들 중 수신점 종속적인 잡음은 수신점 정보정 단계에서 산출될 것이고 속도이상에 관련된 이상 주시라면 보존하여 속도 이상대에 관한 정보가 훼손되지 않도록 해야 한다.

일차에서 사용한 기록 중에서 이상점을 제외하고 다시 곡선 맞춤을 시도하여 해당 송신점의 정보정을 산출한다. Fig. 4에 이차 곡선맞춤 처리 결과를 제시하였다.

이 실험의 2단계 곡선맞춤 과정에서 제외된 이상점들은 일차 곡선맞춤에서 산출된 잔차 분포에서 그 잔차가 분포의 평균에서 표준편차 밖에 있는 기록들이다. 이상점의 선택 기준은

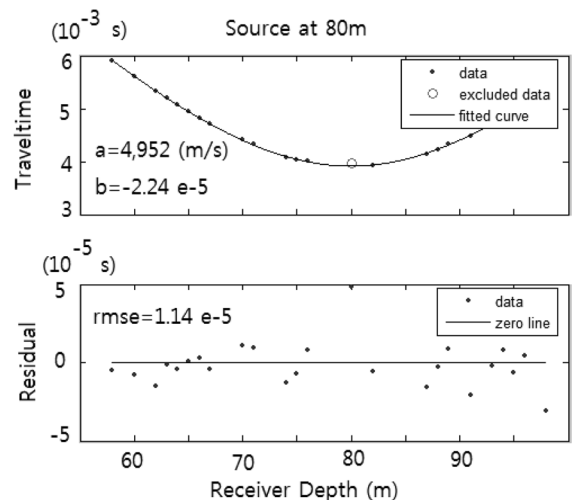


Fig. 4. The second stage curve fitting for the first arrival travel times of the shot record at depth 80 m.

주관적일 수 있으나 몇 개의 기록들을 관찰하여 적절하게 설정할 수 있을 것이다.

이 처리결과와 신뢰도를 표시하는 간접적인 지시자로는 산출 정보정 대 rms 잡음의 비를 참조할 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4의 곡선맞춤에서 신뢰도 지시자의 값은 1.29(1.95/1.51)에서 1.96(2.24/1.14)로 증진되었다.

동일한 방법의 곡선맞춤으로 수신점 종속적인 정보정은 공통 수신점 모음(CRG)에서 산출한다. 송신/수신 종속적인 정보정은 상대적이기 때문에 모든 정보정 값에서 일정한 값을 가감할 수 있다. 원본기록의 시간이동을 최소로 하기위하여 기준값(datum)값은 정보정의 평균값 또는 중앙값을 영(0)으로 하는 것이 일반적이다. 여기서는 산출된 정보정의 평균값을 구하고 모든 정보정 값에서 평균값을 빼 값을 정보정으로 도출하였다.

위에서 논의한 바와 같이 잡음이 첨가된 기록으로부터 추출된 송신/수신 종속적인 정보정 값을 각각 해당 입력 잡음의 분포와 비교한 결과 이들 분포는 매우 유사한 패턴을 보이고 있으나 산출된 정보정 분포는 그 크기에 있어서 기록에 삽입된 잡음의 크기의 1/2 보다 다소 작게 산출되었다(Fig. 5a).

반사법 잔여 정보정과정에서 반복적으로 속도분석과 정보정을 수행하는 것과 같이 본 실험에서도 정보정 산출 및 적용을 반복하여 실시하였다(Fig. 5와 Fig. 6).

Fig. 5와 Fig. 6에 도시된 반복처리 결과를 Fig. 2의 잡음 분포와 비교해보면 반복적으로 산출한 정보정 패턴은 각각 송신/수신 잡음과 유사한 패턴 및 크기에 접근하는 사실을 시각적으로 확인할 수 있다. 그러나 실제 자료처리에서는 이 모의 실험에서와 같은 정확한 정보정 값(입력 잡음)에 대한 정보가 없으므로 반복 횟수를 판단할 기준이 필요하다. 여기서는 각 반복단계에서 정보정 증분 값의 변이를 관찰 하였다. Fig. 7에 제시된 결과를 보면 반복횟수가 증가함에 따라 정보정 증분 대 정보정의 비는 영(0)으로 수렴하고 rms 정보정 대 rms 입력잡

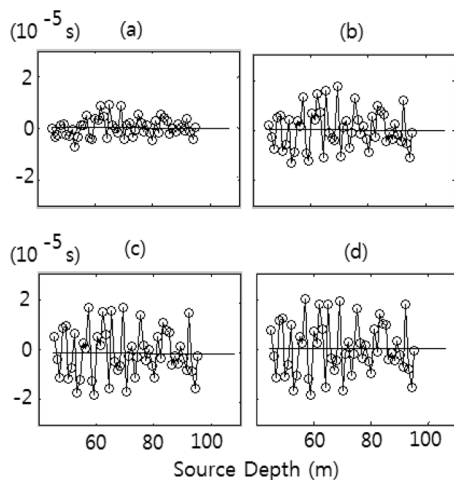


Fig. 5. Iteratively computed source consistent statics. (a), (b), (c), and (d) are statics derived from the first-, 3rd-, 5th-, and 7th-iteration, respectively.

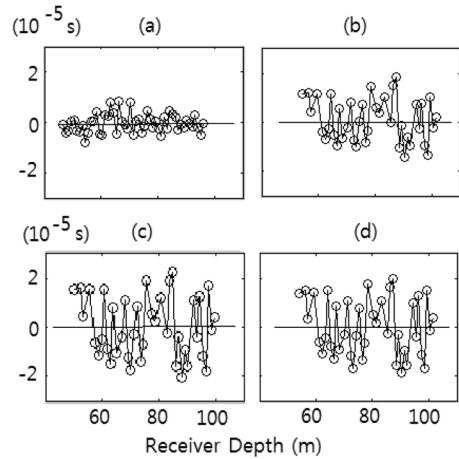


Fig. 6. Iteratively computed receiver consistent statics. (a), (b), (c), and (d) are statics derived from the first-, 3rd-, 5th-, and 7th-iteration, respectively.

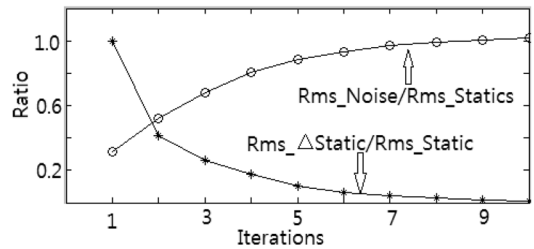


Fig. 7. Ratio versus iteration. The rms magnitude ratio between the input noise and extracted noise (denoted by circles), and the ratio between the statics increment to the statics (denoted by asterisks).

음 비는 1로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 따라서 실제 자료처리의 경우 반복횟수는 정보정 증분 대 정보정의 비를 판단 기준으로 설정하여 처리할 수 있을 것으로 생각된다.

토모그래피

잡음제거 효과를 관찰하기 위하여 a) 송신된 종속적인 잡음이 첨가된 기록, b) 수신점 종속적인 잡음이 첨가된 기록, c)

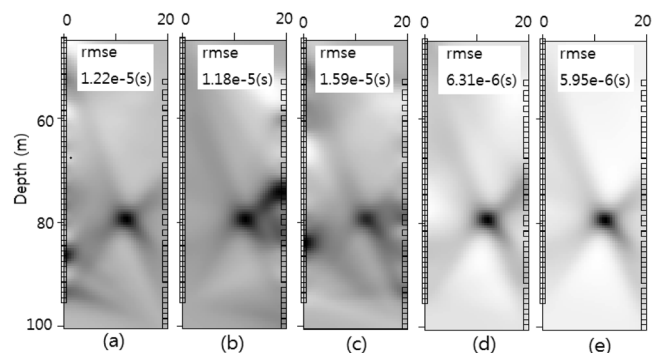


Fig. 8. Velocity tomograms generated from the records (a) with source consistent noise, (b) with receiver consistent noise, (c) with both the source and receiver consistent noise, (d) with statics corrected, and (e) without noise, respectively.

송신원 종속적인 잡음과 수신점 종속적인 잡음 모두 첨가된 기록과 d) 기록 3에 정보정을 7회 반복 처리한 기록 e) 잡음이 없는 기록들을 사용하여 주시토폴로그래피를 실시하여 속도영상을 도출하였다.

Fig. 8에서 보면 잡음이 첨가된 기록을 사용한 토모그램에서는 터널위치 이외에서도 국부적인 저속도 이상대가 형성되었으나 정보정으로 잡음을 제거한 기록을 사용한 토모그램(d)에서는 저속도 이상대 한 개가 정확히 터널위치에 형성되어있음을 관찰할 수 있으며 잡음이 없는 기록의 속도영상(e)과 유사하고 주시 잔차도 비슷한 수준에 접근한 사실을 확인할 수 있다. 이 속도영상들은 5,000 m/s 상속도 초기모델을 사용하여 30회 반복 역산한 결과이다. 이 실험 결과는 송신점과 수신점에 종속적인 잡음은 제안한 정보정 방법에 의하여 효과적으로 처리될 수 있음을 보여준다고 하겠다.

결 론

본 논문의 주제는 시추공 초동주시 자료에 내재한 잡음의 추출 방법에 대한 연구이다. 여기서 잡음이란 특정 송신원 또는 특정 수신점 신호가 탄성파가 전파된 매질과 무관하게 상대적으로 타 기록에 비하여 시간 이동된 상태를 뜻하며 잡음 제거는 각 기록간의 시간 편차를 보정하는 공정이다.

제안한 방법은 공통 송신원 또는 공통 수신점기록의 초동주시들을 대표하는 쌍곡선맞춤을 통하여 반복적으로 해당 송신

점 및 수신점 정보정을 산출하는 방법이다. 모의실험 결과에 의하면 최대 예상 주시지연의 25% 크기의 잡음이 포함된 기록의 실험에서 7회 반복 연산함으로써 입력 잡음과 거의 동일한 수준의 정보정을 도출할 수 있었다. 반복적인 방법으로 안정적인 정보정 도출을 위해 고려할 사항은 각 반복 단계에서 속도의 변화가 크지 않아야하고 단계별 정보정 증분이 영으로 수렴하여야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 한성대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 이 기관에 감사한다.

참고문헌

이두성, 2003, 임펄시브형 시추공용 탄성과 송신신호 시작시간 측정에 관한 연구, 물리탐사, **6**, 71-76.
 이두성, 2009, 초동 주시 측정 오차로 제어된 공대공 주시 토모그래피 사례연구, 물리탐사, **12**, 3, 233-238.
 이두성, 2011, 소규모 저속도 이상대 탐지를 위한 시추공 주시 토모그래피에서 잡음 영향 분석, **14**, 2, 140-145.
 von Trier, J. and W. W. Symes, 1991, Upwind finite-difference calculation of traveltimes, *Geophysics*, **56**, 812-821.
 Wiggins, R. A., Lerner, K. L., and Wisecup, R. D., 1976, Residual statics analysis as a general linear inverse problem, *Geophysics*, **41**, 922-938.