

## 소규모 저속도 이상대 탐지를 위한 시추공 주시 토모그래피에서 잡음 영향 분석

이두성\*

한성대학교 정보시스템공학과

### An Analysis of the Noise Influence on the Cross-well Travel-time Tomography to Detect a Small Scale Low Velocity Body

Doo Sung Lee\*

Information System Engineering, Hansung University

**요 약:** 데이터에 포함된 잡음이 소규모 저속도 이상대 탐지를 위한 시추공 주시토모그래피에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 터널모델에 대하여 유한차분 파선추적 법으로 기록의 초동주시를 산출하고 산출된 초동주시에 세 종류의 잡음과 잡음수준이 다른 네 종류의 백색 잡음을 첨가한 후 SIRT 반복역산 법으로 속도영상을 도출하였다. 첨가된 잡음의 세기가 터널로 인한 기록의 최대 예상 주시지연의 10% 정도인 속도영상에서 저속도 이상대가 정확하게 터널위치에 형성되었다. 그러나 터널의 위치에 산출된 속도는 상정된 속도모델의 속도와는 현저하게 다르며 배경 속도와 비슷하였다. 잡음이 결과영상에 미치는 영향은 무작위 잡음이 송신기나 수신기 종속적인 잡음보다 현저하게 적은 것으로 나타났다.

**주요어:** 주시 토모그래피, 잡음 분석

**Abstract:** In order to analyze the influence of the noise on a cross-well travelttime tomography to detect a small scale low velocity body in a homogeneous medium, the first arrival travel times were computed one a tunnel model by a finite-difference ray tracing scheme. Three different types and four different intensity levels of white noises were added to the computed first arrival travel times, and velocity tomograms were constructed using an iterative inversion method (SIRT). Tomograms with the noise intensity up to 10% of the maximum travelttime delay in the tunnel model, showed the exact location of the tunnel. However, the velocity shown at the tunnel location was not close to air velocity but only slightly less than the velocity of the background medium. The additive random noise showed significantly less degree of influence on the resulting tomogram than the source- and receiver consistent noise.

**Keywords:** travel time tomography, noise analysis

## 서 론

시추공을 이용하는 탄성과 주시 토모그래피는 탐사대상 영역을 투사한 다수의 탄성과 초동주시를 사용하여 매질의 탄성과 속도분포를 산출하고 이 속도영상으로부터 지질구조에 대한 정보를 도출하는 탐사법이다(Berryman, 1991, Dines and Lyttle, 1979, Krajewski *et al.*, 1989). 지하 소규모 이상대의 탐지 가능성은 이상대의 존재로 인한 초동주시 공간의 주시지연을 선택한 탐사법, 즉 축선배열, 탄성과 신호의 분해능, 신호에 포함된 잡음, 그리고 역산법 등의 변수를 고려할 때 모델 공간에서 인지 가능한 크기의 이상대로 표현할 수 있는가하는 문

제에 대한 고찰로 요약할 수 있다(이두성, 2010).

본 논문은 경암 내에 존재하는 소규모 저속도 이상대 탐지를 위한 시추공 탄성과 주시토모그래피에서 기록에 포함된 잡음이 속도영상에 미치는 영향에 대한 모의실험 연구로 균질한 매질 내에 존재하는 소규모 공동을 모델로 하였다. 여기서 상정한 모델과 탐사축선 배열은 터널의 위치가 잘 정의된 시범 지역에서 실시된 현장 시추공 탄성과 탐사(이두성, 2003b)를 토대로 동일하게 설정하였으며 이는 모의실험에 의한 초동주시 및 실제 현장자료의 초동주시의 지연특성을 직접 대비 고찰하기 위함이다. 속도모델 상에서 탐사축선 배열에 대한 이론적 초동주시를 산출하였고, 초동주시에 다양한 크기의 잡음을 첨가한 후 SIRT 방법으로 속도영상을 도출하고 이로부터 잡음이 터널 탐지에 미치는 영향에 대한 분석을 시도하였다.

2011년 2월 16일 접수; 2011년 3월 29일 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

### 지질-속도모델 생성

모의실험 모델의 송/수신 배열과 저속도 이상대의 위치를 Fig. 1에 도시하였다.

이 모의실험에서 모델의 배경 속도는 5,000 m/s 이고 심도 80 m 부근에 위치한 저속도 이상대의 크기는 2×2 m 속도는 340 m/s으로 하였다. Fig. 1에서 왼쪽 시추공에 1 m 간격으로 51개의 송신원을, 오른쪽 시추공에 1 m 간격으로 40개의 수신점을 배치하였다. 본 연구결과와 대비하기 위한 현장탄성과 기록에 8개의 불량기록(dead trace)이 있어서 모의실험에서도 이 측선을 배제하였다.

### 파선추적

각 송신원에서 모든 수신점에 이르는 탄성파의 초동주시와 해당 파선의 궤적은 격자 크기를 0.5×0.5 m로 하는 유한차분

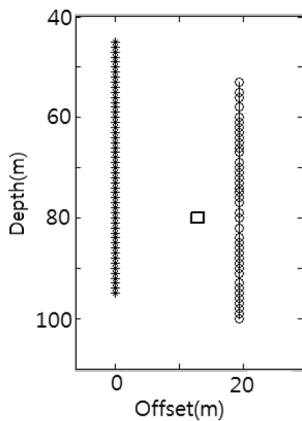


Fig. 1. The source and receiver layout.

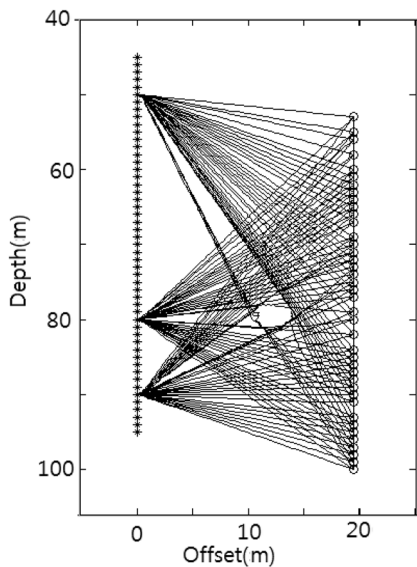


Fig. 2. Raypaths of three selected common source gathers. The depths of the sources are 50, 80, and 90 m.

법에 기초한 파선 추적법으로 산출하였다(von Trier and Symes, 1991, Vidale, 1990). Fig. 2에 3개 송신원 기록의 파선 궤적을 도시하였다.

Fig. 2에 도시된 파선들은 아이코날(eikonal) 방정식으로 정의되는 송수신점 간 최단시간 주시 파선으로 공동을 통과하지 않고 고속의 주위 매질을 통하여 전파한 파선임을 관찰할 수 있다. 따라서 여기서 논의하는 송수신점 간 최단시간 파선들은 저속도 구간을 통과하지 않기 때문에 이 구간의 속도 정보를 보유하지 않으며 만일 이 파선들만 사용한다면 주시 토모그래피로 공동 구간의 속도정보는 도출할 수 없을 것이다.

파동의 전파경로(파선궤적)에 존재하는 이상대가 수신된 기록에 미치는 영향은 각 파선의 프레넬(Fresnel) 영역을 고려하여 분석할 수 있다. 파선상의 한 지점에 있는 이상대의 크기가 그 지점에서 파동의 제 1 프레넬 영역보다 작을 경우 이상대의 존재가 수신 신호에 미치는 영향은 크지 않다. 파동의 제 1 프레넬 영역의 단면은 원으로 그 크기는 파선의 중앙부에서 가장 크다(Fig. 3).

Fig. 3에서 최단 거리 파선은 A에서 O를 통과하여 B에 이르는 파선이다. 이때 파선상의 임의의 점 O에서 제 1 프레넬 반경(OF)은 다음과 같은 조건을 만족한다(Cerveny and Soares, 1992).

$$|t(F, A) + t(F, B) - t(B, A)| = \frac{1}{2}T \tag{1}$$

여기서  $t(F, A)$ 는 F에서 A까지 주시이고, T는 탄성파의 파장(시간)이다. 따라서 소규모 저속도 이상대의 위치가 O 부근이고 이상대의 크기가  $2OF$  보다 작으면 이상대의 존재가 수신 신호의 파형에 미치는 변화는 크지 않을 것이다.

식 (1)을 사용하여 원거리 기록과 근거리 기록의 이상대 부근에서 일차 프레넬 영역의 반경은, 데이터의 주파수가 2 kHz 이고 심도 80 m에서 수평방향 파선의 경우 터널 위치에서 대략 3.7 m 정도이다. 터널의 크기 2 m를 고려하면 주파수가 2 kHz 이하의 기록에서는 터널로 인한 파형의 변화는 크지 않을 것으로 예상된다.

### 초동주시

소규모 공동의 존재가 초동의 주시공간에 표출되는 현상을 관찰하고자 터널이 없는 균질한 매질의 초동과 터널모델의 초동 주시차를 산출하였다. 각 수신점에서 3개의 송신원 기록의

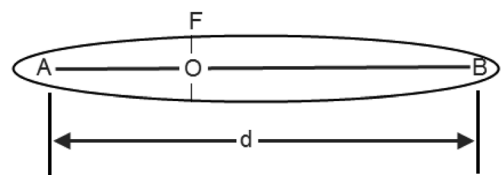


Fig. 3. Schematic presentation of the first Fresnel zone.

주시차 분포를 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4에 도시된 초동주시를 보면 터널의 영향을 가장 크게 받은 기록은 근거리 기록에서 최대 0.045 ms 원거리 기록에서는 0.03 ms이다. 이러한 주시차를 영상화 하기 위해서는 초동 인식의 불확실성이 이보다 작아야 하며 초동발체 오차한계는 신호의 대략 1/4 파장(시간) 정도인 점을 고려하면 주파수가 8 kHz 이상인 고 주파수 탄성과 기록이 필요할 것이다. 이러한 논의는 아이코날 방정식으로 정의되는 파선의 초동주시만을 사용할 경우이다. 그러나 현장 탐사 기록의 경우 고주파성분의 감쇠로 위의 조건에 맞는 신호는 인식이 불확실하여 초동으로 발체하기가 어려울 수도 있다. 이러한 경우를 다음의 현장 자료에서 관찰할 수 있다.

Fig. 5에 도시된 탄성과 기록은 본 모의실험의 대상인 현장 시추공 탄성과 기록 중에서 송신원 90 m의 기록이다(이두성, 2003b). 여기서 가장 뚜렷하고 인접 기록과 연속성이 있는 초동 신호의 골(trough)을 파동의 우세 에너지의 전달로 보고 발체하면 심도 80 m 부근에서(4각형 표시부분) 초동주시의 이상 지연을 관찰할 수 있다. 모의실험에서 도출한 파선계적(Fig. 2)에서 보면 송신원 90 m에서 공동 하부를 통과한 파선 중에서 공동의 영향을 받은 파선들은 수신점 73~77 m 구간이다. Fig. 5의 기록에서 이상대로 인한 초동주시 지연을 대략적으로 살펴보기 위하여 이상대 주변 3개구간의 무브아웃 시간을 측

정하였다. 수신점 구간 69~72 m, 76~79 m, 79~82 m에서 무브아웃은 각각 0.3, 0.5, 0.2 ms이다. 만일 터널이 없다면 76~79 m 구간의 무브아웃은 0.2와 0.3 ms 사이의 한 값일 것이다. 따라서 0.5 ms 무브아웃은 이 구간에서 공동의 존재로 인한 초동 주시의 지연이 0.2 ms 이상임을 제시하며 이는 모의실험 결과인 0.045 ms 보다는 현저하게 큰 수치임을 알 수 있다. 이 현상은 현장자료의 경우 초동으로 인지될 확률이 높은 신호는 무한 주파수의 최단주시 파동이 아니고 공동의 직접적인 영향을 받은 신호일 경우가 있을 수 있다는 사실을 제시한다고 생각할 수 있다.

위의 현장 기록에서 0.045 ms의 주시지연에 해당하는 최단 주시 신호가 인식 가능한지 관찰하기 위해서 초동신호 부근의 이득(gain)을 증가시키고 이에 해당하는 76~79 m 구간의 탄성과 신호를 Fig. 5의 오른쪽에 점선으로 도시하였다. 점선 부분의 신호는 세기가 극히 미약하여 실제 기록 환경의 잡음을 고려할 때 초동으로 인식하기에는 불확실성이 매우 높다고 판단되며, 또한 점선과 우세신호의 골 사이 구간의 기록을 보면 이상대 구간의 기록들에서는 파형변화가 관찰되며 인접한 트레이스와의 연속성(비슷한 위상)을 고려할 때 점선 부분을 초동으로 선택하기는 어렵다고 판단된다.

### 역산 실험

터널모델을 사용하여 생성한 초동주시를 측정주시로 사용하여 SIRT법에 의한 역산을 수행하였다. 초기 모델로 5,000 m/s 상속도 모델을 사용하였다. Fig. 6에 20회와 30회 반복역산 결과를 도시 하였다.

20회와 30회 반복역산 결과는 매우 유사하며 정확하게 터널의 위치에 저속도 이상대를 표출하고 있으나 이상대의 속도는 두 토모그램 모두 공기 중의 속도와는 상당한 차이가 있으며 배경속도와 비슷한 수준이다. 속도 토모그램에서 터널의 속도를 도출할 수 없다는 사실은 모의실험에서도 예측되었던 사실

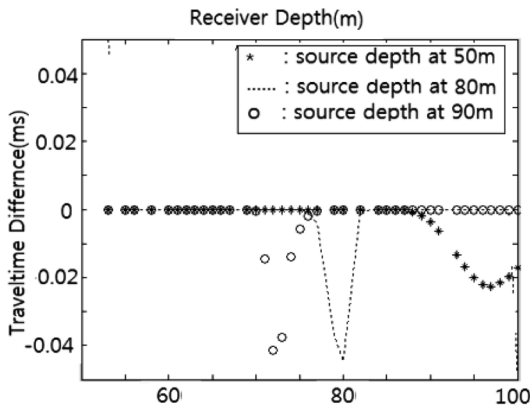


Fig. 4. Traveltime differences ( $T_{homogeneous} - T_{tunnel}$ ) of three common source records.

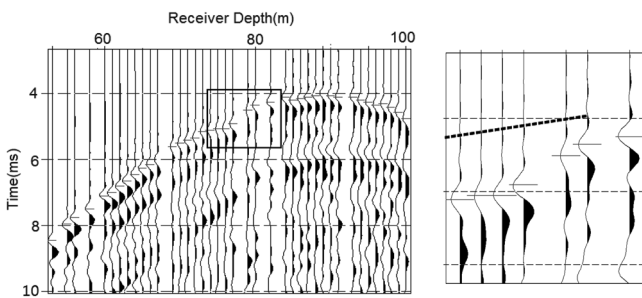


Fig. 5. Common shot gather with the source depth at 90 m. The data inside the rectangle at the left are displayed with increased gain at the right.

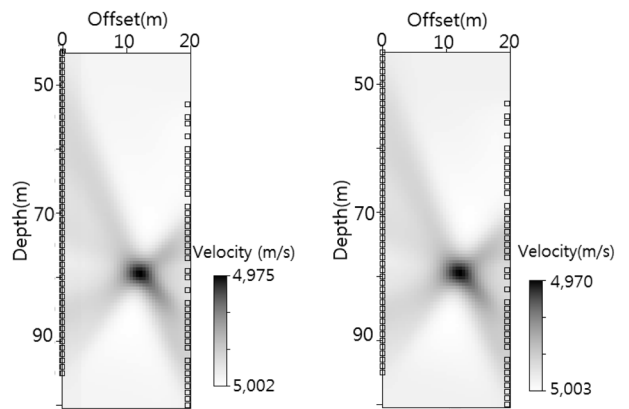


Fig. 6. Tomographic velocity models at 20th (left) and 30th (right) iteration.

이다. 즉 Fig. 2에 도시된 아이코날 방정식으로 정의되는 최단 주시 파선들은 저속도로 표시된 터널 구간을 통과하지 않기 때문에 터널 구간의 속도 정보를 제공하지 못한다.

역산과정에서 이론주시와 재구성된 모델주시의 적합도의 척도로 rms 주시차를 Fig. 7에 제시하였다. 20회 이상에서 rms 오차는  $6 \mu\text{s}$ 에 수렴하고 있다. 또한 상정한 실제 터널 속도모델과 재구성된 토모그램 속도모델의 차이를 검토하기 위하여 모델의 rms 오차를 계산하였다. 5회, 20회, 30회 반복역산 단계에서 rms 오차는 각각 279, 278, 277 m/s 이다. 데이터의 rms 오차는 7.5에서  $6 \mu\text{s}$  이하로 줄었으나 모델 rms 오차는 별로 감소되지 않았다. 이는 최단 주시 파선조합을 사용한 SIRT 역산은 소규모 공동의 위치정보는 제공하나 속도정보는 제공하지 못한다는 사실을 제시한다 하겠다.

### 오차분석

이 모의실험으로부터 소규모 공동에 의한 초동주시의 지연은 매우 작으므로 초동 발체오차 문제가 탐사목적 달성에 중요한 요소이다. 초동인식의 오차는 기록에 유입된 다양한 종류의 잡음에 기인한다고 생각할 수 있으며, 시추공 토모그래피 자료에 관련된 잡음은 그 원인에 따라 인위적, 기계적, 환경적인 잡음으로 생각할 수 있다.

환경적인 잡음은 기록 시 주위환경의 변화 및 파동 신호의 불규칙한 감쇠로 인한 초동 인식의 불확실성 등을 생각할 수 있고(이두성, 2009), 인위적 요인의 잡음으로는 송/수신기의 위치 설정의 불확실성을 생각할 수 있다. 현재 국내에서 시행되는 시추공 탄성과 탐사는 한 시추공에 다중채널 하이드폰 수신기배열을 설치하고 다른 시추공에 일정 간격으로 진원을 이동하면서 공통 송신원(common source) 모음으로 자료를 획득하는 방법이 일반적이다. 이 과정에서 송신원 케이블의 이동을 수작업으로 하는 경우 송신원을 계획된 송신점으로 이동하는데 다소 오차가 유입될 수 있으며 특히 수신기 배열이 복수인 경우 수신기배열마다 송신원 스위프(sweep)을 하는데 이때도 송신기위치에 대한 오차가 유입될 수 있다. 이러한 자료획득 방법에서는 송신점 위치설정의 오차가 수신점 위치설정의 오차보다 클 확률이 높다. 기계적 요인의 잡음은 송신원의 트리거 시각과 실제로 송신원에서 에너지가 매질로 전달되는 시각

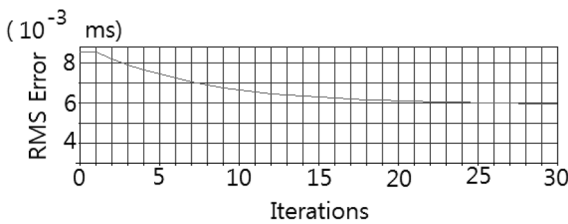


Fig. 7. Diagnostics for the model and data match. Traveltime rms error versus iteration of the inversion.

의 차이, 수신기와 매질의 접촉상태 및 수신기의 감응상태 등의 차이에 따른 잡음을 고려할 수 있다(이두성, 2003a).

모의실험으로 산출한 초동주시 기록에 잡음을 첨가한 후 30회 반복 역산을 수행하여 도출한 속도모델을 관찰하여 위의 세 가지 잡음이 역산 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 잡음으로 난수를 발생하고 난수의 rms를 최대 예상 주시지연(0.045 ms)의 5%, 10%, 25%, 그리고 50% 되도록 생성하였다.

잡음 영향을 고찰하기 위해 다음의 세 가지 방법으로 실험하였다. 첫째로 송신원에 종속적인 경우로 송신원 수 51개에 해당하는 51 샘플의 백색잡음을 각각의 공통 송신원 기록(초동주시)에 첨가하였고, 둘째로 수신점 종속적 경우는 수신점

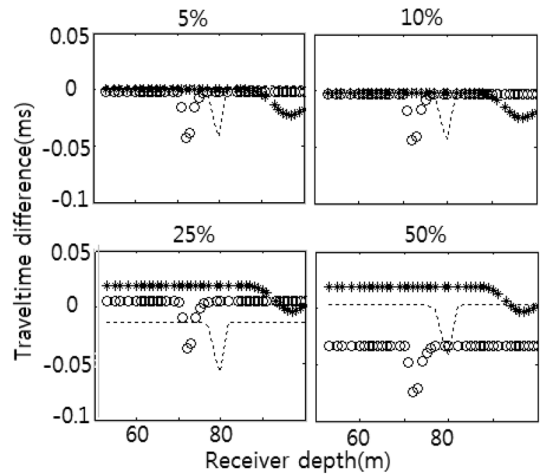


Fig. 8. Traveltime differences ( $T_{\text{homogeneous}} - T_{\text{tunnel}}$ ) of three common source records with source consistent noise. Symbols of the asterisk, dotted-line, and circle, denote the records with source depth at 50-, 80-, and 90 m, respectively.

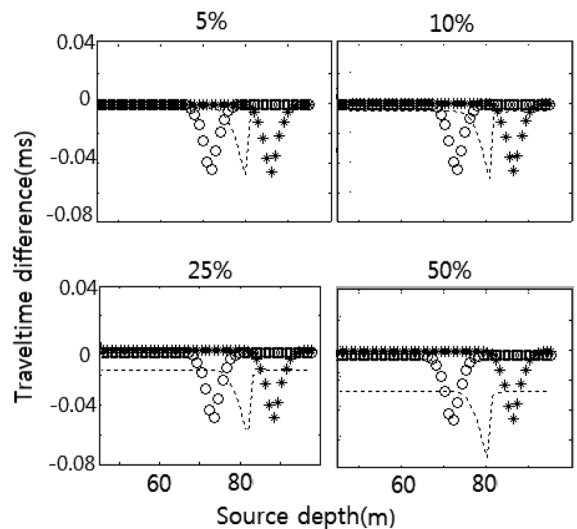
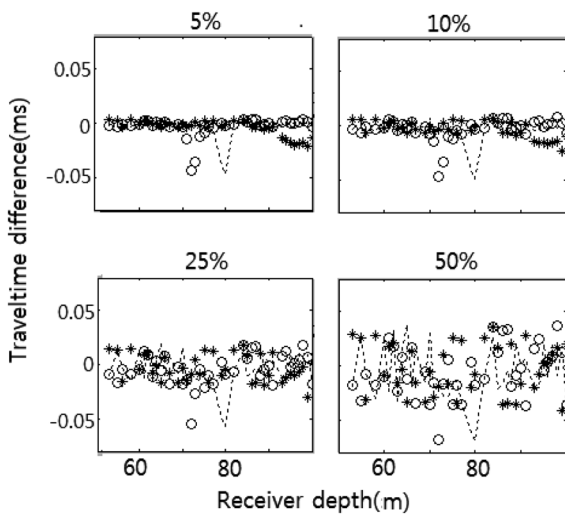


Fig. 9. Traveltime differences ( $T_{\text{homogeneous}} - T_{\text{tunnel}}$ ) of three common receiver records with receiver consistent noise. Symbols of the asterisk, dotted-line, and circle, denote the records with receiver depth at 75-, 80-, and 85 m, respectively.

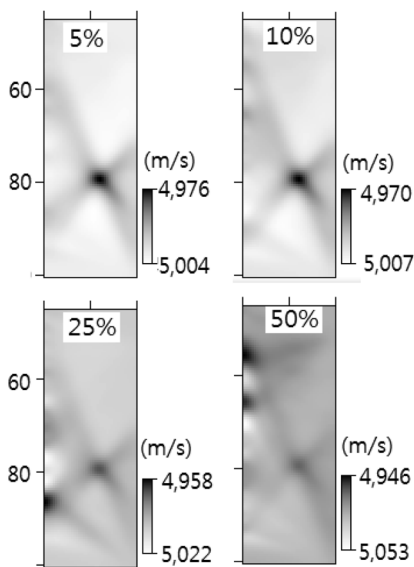
수 40개에 해당하는 40 샘플의 백색잡음을 40개 공통 수신점 기록에 첨가하였고, 셋째로 무작위 잡음(random noise)으로 총 기록 2040개에 해당하는 2040개 샘플의 백색잡음을 생성하여 각 기록에 첨가하였다. 잡음이 첨가된 상태의 세 개 기록의 주시차 곡선을 Figs. 8 ~ 10에 도시하였다.

Figs. 8 ~ 10에 제시한 잡음이 첨가된 초동기록을 관찰하면 rms 오차가 25% 이상인 경우 터널로 인한 주시지연 패턴이 왜곡되거나(Fig. 10) 주시곡선이 측정할 수 있을 정도로 이동함을 관찰할 수 있다(Figs. 8, 9).

잡음이 첨가된 기록을 SIRT 방법으로 30회 반복 역산한 속도영상을 Figs. 11 ~ 13에 도시하였다.

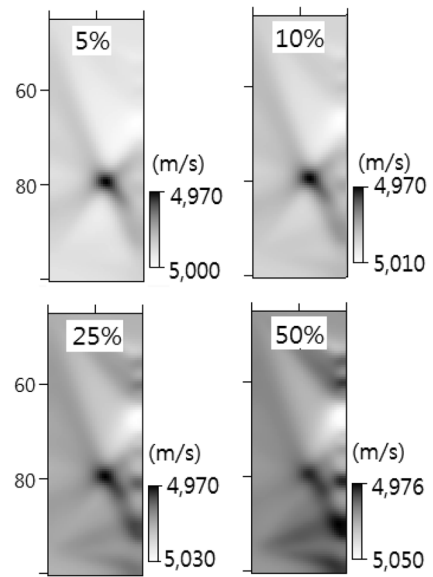


**Fig. 10.** Traveltime differences ( $T_{homogeneous} - T_{tunnel}$ ) of three common source records with random noise. Symbols of the asterisk, dotted-line, and circle, denote, the records with source depth at 50-, 80-, and 90 m respectively.

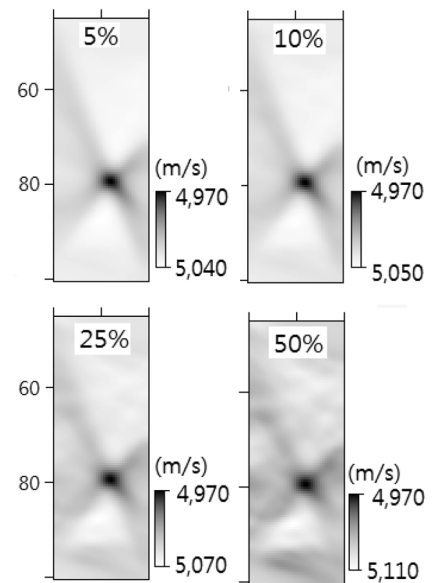


**Fig. 11.** Velocity tomograms generated from the records contaminated by four different levels of source-consistent noise.

잡음이 첨가된 기록의 속도영상에서 보면 잡음이 송신원 종속(Fig. 11)이나 수신점 종속(Fig. 12)인 경우 잡음의 rms가 10% 이하인 경우 저속도 이상대는 정확하게 터널의 위치에 형성되고 있고 rms 25% 이상에서는 터널 위치 이외에서도 저속도 이상대가 확인된다. 그러나 기록 전체에 백색잡음이 첨가된 경우 rms 25% 이상인 경우도 비교적 정확한 터널의 위치에만 저속도 이상대가 표출되고 있다. 이 실험 결과 송/수신기에 종속적인 잡음은 분포가 무작위 한 백색 잡음이라도 토모그래피 속도영상에 미치는 영향이 심각한 사실을 알 수 있다. 따라서 송/수신기 종속적인 잡음은 전처리 과정에서 최대 예상 주시



**Fig. 12.** Velocity tomograms generated from the records contaminated by four different levels of receiver-consistent noise.



**Fig. 13.** Velocity tomograms generated from the records contaminated by four different levels of the random noise.

**Table 1.** Data (travel-time) and model (velocity) rms error

	no noise	5% noise	10% noise	25% noise	50% noise
Data (Source)	5.95 $\mu$ s	6.28 $\mu$ s	7.21 $\mu$ s	12.2 $\mu$ s	21.5 $\mu$ s
Data (Receiver)		6.26 $\mu$ s	7.16 $\mu$ s	11.8 $\mu$ s	21.3 $\mu$ s
Data (Random)		6.34 $\mu$ s	7.40 $\mu$ s	11.8 $\mu$ s	21.3 $\mu$ s
Model (Source)	277 m/s	277.5 m/s	277.5 m/s	277.5 m/s	277.7 m/s
Model (Receiver)		277.7 m/s	277.8 m/s	278.0 m/s	278.4 m/s
Model (Random)		277.7 m/s	277.8 m/s	277.7 m/s	277.6 m/s

지연의 10% 이하 수준으로 감소 또는 제거함이 필요할 것으로 판단된다.

주시 토모그래피 역산은 초동주시의 불일치(misfit)를 최소로 하는 속도모델을 도출하는 방법이다. 그러나 이상적인 역산 결과는 도출된 속도모델과 실제 지질모델과 불일치가 최소인 경우이다. 따라서 토모그래피의 성공적 재구성 성능의 평가는 속도 토모그램이 얼마나 잘 지질모델을 묘사하고 있는나 하는 정량적인 척도가 있으면 가능할 것이다. 위의 각 역산 결과에 해당하는 데이터 불일치(모델주시와 측정주시 차이)와 모델 불일치(실제모델과 토모그래피 속도모델의 차이)를 측정하는 척도로 각각의 rms 오차를 Table 1에 제시하였다.

모델주시와 측정주시의 차이는 잡음의 영향에 반응하나 실제 모델과 도출된 모델의 차이는 잡음의 영향에 거의 독립적이다. 이 결과는 사용한 초동 주시가 공동의 속도를 반영하지 않은 파선들, 즉 공동을 통과하지 않은 파선들만으로 구성되어 있다면 속도영상은 단지 터널의 위치정보만을 제공한다는 사실을 제시한다고 하겠다.

## 결 론

기록에 포함된 잡음이 소규모 공동 탐지를 위한 시추공 탄성과 주시 토모그래피에 미치는 영향을 분석하기 위하여 모의 실험을 수행하였다. 모의실험 대상은 터널의 위치가 잘 정의된 시범지역에서 수행했던 현장 시추공 탄성과 탐사이다. 수치모델은 대략 20 m의 시추공 사이에 존재하는 2 × 2 m 터널이다. 설정한 모델 상에서 파선추적으로 도출된 파선들은 모두 터널주위를 돌아가는 파선들로 확인되었으며 산출된 최대 초동주시(터널로 인한)지연은 0.045 ms이다. 이러한 주시차를 성공적으로 측정, 발췌하려면 첫째로 측정, 발췌오차가 이보다 적어야하므로 전파신호의 신호 대 잡음비를 고려한 측정가능한 수준의 에너지를 보유한 초동의 주파수가 8 kHz 이상이어야 하며 둘째로 주시지연의 원인이 되는 각종 잡음도 이보다 작아야한다. 사실 이러한 조건은 현재 국내에서 사용되는 탐사 장비나 현장조건을 고려하면 만족시키기 어렵다. 그러나 실제 탐사기록에서 아이코날 방정식으로 정의되는 최단주시 신호는 고주파 성분으로 감쇠되어 인식이 불확실하고 관측할만한 진폭을 보유한 신호가 터널의 일부를 통과한 파선일 경우는 현재 국내에서 사용되고 있는 장비로도 주시이상 측정 가능할

것으로 생각된다.

주시 기록에 첨가된 잡음이 크지 않은 경우 속도영상에 표출된 저속도 이상대는 정확하게 터널위치에 형성되었으나 속도 이상대의 속도는 입력 모델 속도와는 차이가 현저하였다. 따라서 속도 토모그램에서는 공동의 위치정보만을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 실험결과에 의하면 잡음이 속도 토모그램에 미치는 영향은 송신/수신 종속적인 잡음이 전체 기록에 포함된 무작위 잡음보다 심각한 것으로 분석되었다. 따라서 송/수신 종속적인 잡음은 전처리 과정에서 최대한 보정이 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

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

## 참고문헌

- 이두성, 2003a, 임펄시브형 시추공용 탄성과 송신신호 시작시간 측정에 관한 연구, 물리탐사, **6**, 2, 71-76.
- 이두성, 2003b, 임펄시브 진원에 의한 공대공 탄성파기록 으로부터 P파, S파 속도영상 도출에 관한연구, 물리탐사, **6**, 3, 138-142.
- 이두성, 2009, 초동 주시 측정 오차로 제어된 공대공 주시 토모그래피 사례연구, 물리탐사, **12**, 3, 233-238.
- 이두성, 2010, 시추공 탄성과 주시 토모그래피의 신뢰도 평가에 관한 연구, 물리탐사, **13**, 4, 330-335.
- Berryman, J. G., 1991, *Lecture Notes on Nonlinear Inversion and Tomography: I. Borehole Seismic Tomography*, Lawrence Livermore National Laboratory.
- Cervený, V. and Soares, J. E. P., 1992, Fresnel volume ray tracing, *Geophysics* **57**, 902-915.
- 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.
- 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.