

시추공 탄성과 주시 토모그래피의 신뢰도 평가에 관한 연구

이두성 *

한성대학교 정보시스템공학과

A Study on the Reliability Evaluation of the Cross-well Seismic Travel-time Tomography

Doo Sung Lee*

Department of Information System Engineering, Hansung University

요 약: 시추공 주시 토모그래피에 의하여 도출된 속도 영상의 신뢰도 평가를 위하여 파선-속도격자의 결합도와 시스템 행렬의 역산 특성 분석에 대한 연구를 실시하였다. 분석 대상은 SIRT법에 의하여 도출된 속도 모델과 이를 도출한 초동 주시와 파선 정보이다. 파선-속도격자 결합도는 파선 밀도 즉 격자 당 투사 파선 수와 파선 선분들의 합으로 산출하였고, 도출된 속도모델의 분해능 및 불확실성에 대한 정보는 데이터 공간(초동주시)과 모델 공간(속도모델)을 관련짓는 시스템 행렬의 특이 값 분해로부터 도출하였다.

주요어: 주시 토모그래피, 분해능 행렬, 불확실성, 파선밀도

Abstract: In order to estimate the confidence level of the velocity distribution shown in a velocity image reconstructed from a travel-time tomography, the ray coverage and the inversion characteristics of the system matrix were investigated. The targets of the analysis is the first arrival travel-time, the raypath information, and the resulting velocity model. The ray coverage, degree of ray and model coupling, was estimated by the number of rays and total ray length in a velocity grid, and information regarding the resolution and uncertainties involved in the reconstructed velocity model was derived from the results of the SVD analysis of the system matrix that relates the data space (first arrival travel times) to the model space (velocity distribution in tomogram).

Keywords: Travel time tomography, Resolution Matrix, Uncertainties, Ray Density

서 론

시추공을 이용하는 탄성과 주시 토모그래피는 고속도로, 교량, 철도, 및 기타 지상/지하 구조물 건설을 위해 지반의 파쇄대 또는 연약대의 확인 등 지반조사에서 보편적으로 사용되고 있으며, 지표탐사로는 목적하는 분해능을 성취하기 어려운 지하 암반 내의 공동 터널 등 소규모의 이상구조에 대한 정밀탐사 목적으로 적용되고 있다. 지하 소규모 이상대는 토모그래피 결과로 도출된 속도영상에서 표출되는, 속도 이상대로부터 탐지하는 방법이 보편적이거나, 토모그래피 속도영상은 지질구조 외적인 다양한 요소에 의하여 영향을 받을 수 있다. 따라서 속도 이상대와 암석의 이상대를 연관 짓는 해석과정의 오류를 감소시키려면 탄성과 주시 토모그래피와 관련된 다양한 불확

실한 요소에 대한 고찰이 필요하다.

탄성과 주시 토모그래피 속도영상의 신뢰도에 영향을 주는 요소로는 측정 데이터가 내포한 불확실성(이두성, 2007), 모델 설정과 파선추적법의 적합성, 모델공간과 데이터공간을 규정하는 시스템의 적합성 등 다양한 요소를 고려할 수 있다. 이 연구에서는 설정된 모델공간과 측정 데이터공간을 규정하는 관계에 대한 시스템 이론(Wiggins, 1972; Jackson, 1973)에 근거하여 해석하고자 하는 속도영상의 영역별 신뢰도 평가에 사용할 수 있는 정량적인 2차 정보를 산출하고 이를 도출된 영상의 신뢰도 분석에 이용하는 방법을 제시하였다. 데이터공간과 모델공간사이의 관계를 규정하는 시스템 행렬은 각 속도격자 상에 분포하는 각 파선의 선분을 원소로 한다. 따라서 이 시스템행렬은 탐사 영역을 투사한 파선과 영상을 구성한 격자의 결합상태에 대한 정보를 보유하고 있다.

이 논문에서 사용한 자료는 경암 내에 존재하는 소규모 터널 탐지를 위하여 수행된 공대공 탄성과 자료이며 속도영상은 탄성과 주시 토모그래피에서 자주 사용되는 반복 역산법의 하나인 SIRT법에 의하여 도출되었다(이두성, 2003).

2010년 8월 24일 접수; 2010년 11월 7일 수정; 2010년 11월 17일 채택
*Corresponding author

E-mail: dslee@hansung.ac.kr

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

탄성과 주시토모그래피 시스템

일반적으로 탄성과 주시 토모그래피는 임의의 초기 속도모델을 가정하고 반복적으로 속도 모델을 개선하여 모델 주시와 측정 주시간의 차이를 감소시켜 주시차가 측정오차 한계와 비교하여 무시할 정도로 적을 때 까지 모델을 개선하는 방법이다. 따라서 최종단계에서 재구성한 모델과 측정 주시와의 관계는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$t \approx \hat{A}s \tag{1}$$

여기서 t 와 s 는 열벡터(column vector)로서 각각 측정된 초동주시와 모델 구성격자의 역속도이고 행렬 \hat{A} 의 원소는 모델 격자에 통과한 파선 선분으로 구성된다. 토모그래피는 시스템 방정식 (1)로부터 모델 s 를 산출하는 공정으로 볼 수 있고 이 역산 결과에 대한 평가는 최종 반복 단계의 속도모델 상에서 파선추적을 통하여 도출된 파선과 모델 구성 격자의 결합 상태에 의하여 규정되는 행렬 \hat{A} 를 분석함으로써 가능하다고 보고되고 있다(Jackson 1972; Lines and Treitel, 1984). 행렬 \hat{A} 의 원소는 각 파선의 각 속도격자 상의 선분으로 행렬 \hat{A} 의 크기는 $N(\text{파선 수}) \times M(\text{격자 수})$ 이다.

탄성과 토모그래피의 축선 구성의 특성상 행렬 \hat{A} 의 원소는 다수가 영(0)으로 이러한 행렬의 역산 특성을 분석하는 도구로는 특이값 분해(SVD: singular value decomposition) 방법이 보편적으로 사용되고 있다. 이 분석방법을 시추공 주시 토모그래피에 적용하면 행렬 \hat{A} 는 다음과 같이 행렬들의 곱으로 표시할 수 있다.

$$\hat{A} = \hat{U}\hat{\Lambda}\hat{V}^T \tag{2}$$

여기서 \hat{U} 와 \hat{V} 는 각각 크기가 $(N \times N)$, $(M \times M)$ 인 유니타리(unitary) 행렬이고, $\hat{\Lambda}$ 는 크기가 $(N \times M)$ 인 대각 행렬(diagonal matrix)로 이 대각선 성분은 행렬의 특이 값으로 구성된다. 행렬 \hat{A} 의 열벡터 v_i 는 모델공간의 직교베이스이고 \hat{U} 의 열벡터 u_i 는 데이터공간의 직교 베이스이다. 즉 토모그래피 시스템 식 (1)에서 속도모델은 서로 독립적인 열벡터 v_i 의 선형조합으로 표시할 수 있고 대응하는 이론 주시 \hat{U} 의 열벡터 u_i 의 선형조합으로 표시할 수 있다.

상술한 시스템 행렬 \hat{A} 의 역행렬 산출 방법으로 이용되는 의사 역산(pseudo inverse)은 다음과 같이 표현된다(Penrose, 1955).

$$\hat{H} = \hat{V}\hat{\Lambda}^{-1}\hat{U}^T \tag{3}$$

여기서 $\hat{\Lambda}^{-1}$ 은 특이행렬 $\hat{\Lambda}$ 의 역행렬로 대각행렬이며 이 행렬의 대각선 성분은 $\hat{\Lambda}$ 의 대각성분이 영이 아닌 경우는 그의 역수로 영인 성분은 그대로 영으로 유지한 행렬의 전치이다. 의사 역산은 식 (1)과 (3)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{s} = \hat{H}t = \hat{V}\hat{\Lambda}^{-1}\hat{U}^T \tag{4}$$

Jackson (1972)은 의사 역산을 평가하는 판단 기준으로 다음의 세 조건, 즉 모델주시와 측정주시와의 적합정도를 측정하는 척도로 (a) $\hat{A}\hat{H} \approx \hat{I}_N$, 도출된 모델의 고유해에 대한 척도로 (b) $\hat{H}\hat{A} \approx \hat{I}_M$, 그리고 도출된 모델의 불확실성의 척도로 (c) $var(\hat{s}_i) = \sum_{i=1}^N \hat{H}_{ki}^2 var(t_i)$ 를 제시하였다.

조건 (a)와 (b)의 행렬은 각각 정보밀도(information density) 행렬과 분해능(resolution) 행렬로 불리는데 이 행렬이 단위행렬(identity matrix)일 경우가 최우수 조건이라 할 수 있다. 조건 (c)는 산출된 모델에 내재한 불확실성(역산의 안정성)에 대한 정보로 여기서는 초동주시 발체의 오류가 모델에 미치는 영향으로 표현되었다.

이 연구의 목적은 탄성과 주시 토모그래피 영상해석에 대한 신뢰도를 평가하고자 하는 시도의 일환으로 주요 관심 사항은 재구성한 영상의 영역별 분해능과 그의 신뢰도 평가에 필요한 이차 정보의 산출에 있다. 따라서 이 연구에서는 SIRT법에 의하여 도출된 영상에 대하여 일차적으로 속도 격자의 파선 밀도를 산출하고 Jackson의 세 조건 중에서 (b)와 (c)의 조건을 현장자료에 적용하여 분석하였으며 최종적으로 탄성과 주시 토모그래피 영상의 사후처리(post processing) 및 해석을 위한 하나의 지침을 제시하고자 하였다.

현장자료에의 적용

이 연구에서 사용한 시추공을 이용한 탄성과 주시 토모그래피 데이터는 철원 지역의 경암 내에 존재하는 소규모 터널 탐지를 위하여 획득된 탄성과 데이터로 획득 매개변수는 시추공 간 평균거리: 19.5 m, 탐사구간 (심도): 50 ~ 100 m, 수진기 간격: 1 m, 진원간격: 1 m, 터널위치 (심도): 80 m이다(이두성, 2003).

탄성과 주시 토모그래피 데이터는 51개 진원과 40개 수신점으로 구성되어 총 트레이스 수는 2040개 이다. 탄성과 주시 토모그래피에서 모델은 일정한 크기의 상속도 격자로 구성하는 방법이 일반적이다. 소규모 속도 이상대를 탐지하려면 작은 크기의 속도격자의 설정이 필요하나 격자 크기는 측정 데이터의 잡음 수준에 따른 초동 발체 오차, 기록의 우세 주파수, 파선 추적 방법, 투사 파선의 밀도 등 다양한 요소에 의하여 제한된다. 본 자료를 사용한 과거 연구에서 데이터의 주파수 특성에 따른 공간 분해능(Krajewski et al., 1989) 분석에 의하면 탐지 가능한 터널에 의한 저속도 이상대의 크기를 최소 3 m로 산출한 바 있다(이두성, 2009).

이 적용실험에서는 모델을 분할하는 격자의 크기를 50 cm × 50 cm인 model A 와 100 cm × 100 cm인 모델 B 두 경우를 상정하고 분석을 시도하였다. 속도모델 A는 수평방향으로 40개 수직방향으로 111개 총 4440개의 격자로 구성되고 모델

B의 격자수는 수직방향으로 56 수평방향으로 21 총 1176개이다.

속도영상 분석

모델 A의 역산 행렬 \hat{A} 의 크기는 2040×4440 으로 이 역산은 미지수(속도모델의 격자 수)가 데이터(초동 주시)보다 많은

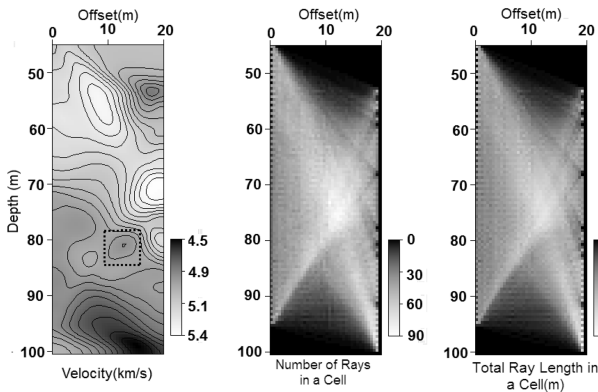


Fig. 1. Velocity tomogram using model A. From the left velocity tomogram, number of rays passed in a cell, and total length of ray segments in a cell.

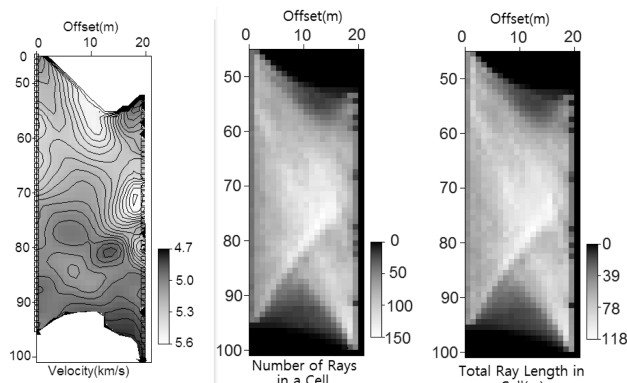


Fig. 2. Velocity tomogram using model B. From the left velocity tomogram, number of rays passed in a cell, and total length of ray segments in a cell.

과소결정(under-determined) 시스템이다. 따라서 역산의 정확한 고유해는 존재하지 않는다.

SIRT 방법으로 40회 반복 역산 후 도출된 속도 영상과 각 속도격자의 파선 밀도, 즉 격자 당 파선 수 및 격자를 통과한 파선길이의 합에 관한 정보를 Fig. 1에 제시하였다. 이두성(2003)은 Fig. 1의 제일 왼쪽에 제시한 영상에서 점선 사각형으로 표시한 저속영역을 터널로 해석하였다. 탄성과 주시 토모그래피에서는 속도 격자와 파선의 결합 상태를 영상의 분해능을 결정하는 핵심 요소로 알려져 있다. 투사된 파선 수가 극히 적은 격자의 속도는 신뢰도가 낮다고 볼 수 있다.

동일한 방법으로 처리한 모델 B에 대한 정보를 Fig. 2에 제시하였다. 영상 표현 범위에 제외하는 것이 바람직한 격자 당 최저 파선 수에 대한 수치적 판단 기준은 탐사 파라미터를 고려하여 해석자가 선정 할 수 있겠다. Fig. 2의 속도영상은 격자 당 파선 수가 25 이하인 영역을 제외하였다.

역산행렬 분석

역산 결과를 산출한 모델 상의 파선 분포로부터 식 (1)의 행렬 \hat{A} 를 정의하였다. 여기서 시스템 행렬은 희소행렬(sparse matrix)로서 모델 A는 총 9,057,600 (2040×4440) 원소 중에서 영이 아닌 원소 수는 143,836이고 모델 B의 역산행렬은 총 원소 2,399,040 (2040×1176)개 중에서 영이 아닌 원소가 71,956개이다.

2개의 모델과 관련된 시스템 행렬 \hat{A} 에 관한 분석 자료를 Table 1에 제시하였다.

모델 A의 경우 \hat{U} 와 \hat{V} 는 각각 2040×2040 과 $4440 \times$

Table 1. Characteristics of the system matrices for the model A and model B.

Model	size of the matrix \hat{A}	Number of eigen values ($\lambda > 0$)	size of \hat{U}^p	size of \hat{V}^p
A	2040×4440	2040	2040×2040	4440×2040
B	2040×1176	953	2040×953	1176×953

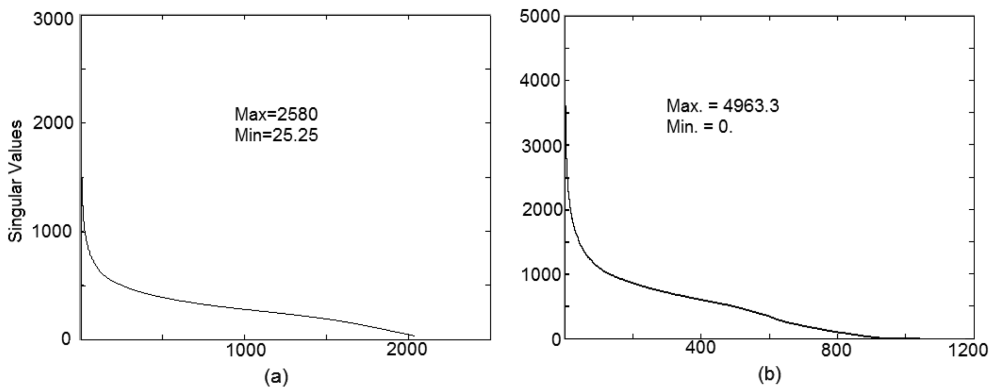


Fig. 3. Diagonal elements of the \hat{A} in model A (a) and in model B (b).

4440 크기의 유니타리 행렬이고, \hat{A} 는 크기가 2040×4440 인 데 대각성분 2040은 행렬 \hat{A} 의 특이값(singular value)으로 구성되고 나머지 원소는 영인 행렬이다. 모델 A의 경우 시스템 행렬의 rank는 2040으로 계산되었다(Fig. 3a).

따라서 2040개 측선에 의한 파선 데이터는 이 시스템에서 통계적으로 독립적인 것으로 해석된다. 행렬 \hat{V} 의 4440개 열 중에서 1 ~ 2040 개열만 영이 아닌 특이 값에 해당하는 특이 벡터로 구성된다. 따라서 이 역산 시스템은 데이터 수가 모델 수 보다 작은 과소결정 시스템으로 고유해는 존재하지 않는다.

모델 B의 경우 산출된 \hat{U} , \hat{V} , \hat{A} 는 크기가 각각 2040×2040 , 1176×1176 , 2040×1176 이다. 여기서 행렬 \hat{A} 의 rank는 953으로 영이 아닌 특이 값은 953개이다(Fig 3b). 따라서 2040개의 파선 중에서 속도모델에 대하여 통계적으로 독립적인 데이터는 953개이고 모델 변화에 민감한 행렬 \hat{V} 의 열 벡터 또한 953개이다. 여기서 행렬 \hat{U} 와 \hat{V} 의 각각의 열 953 ~ 2040, 953 ~ 1176은 특이 값 영에 해당되는 벡터로서 모델 구성에 독립적인 데이터가 아니다. 따라서 이 시스템은 데이터 수는 모델 수보다 많으나 독립적인 데이터 수는 모델 수보다 적은 시스템으로 정확한 역산 해는 존재하지 않고 다수의 최소제곱(주시 차) 해만 존재한다.

분해능 분석

위의 두 모델의 역산행렬 분석에 의하면 두 경우 모두 역산의 고유해나 정확한 해는 존재하지 않는다. 따라서 반복 주시 토모그래피에 의하여 도출된 속도 영상은 다수의 재구성된 모델 주시와 측정 주시의 차를 최소화 하는 최소제곱 해 중의 하나로 볼 수 있으며 대부분의 시추공 탄성과 주시 토모그래피는 이 경우에 해당한다고 생각할 수 있다.

Fig. 1과 Fig. 2에 제시된 속도영상에 대한 분해능 평가를 위하여 각각의 분해능 행렬 \hat{V} 를 분석하였다. 행렬 \hat{V} 의 열벡터 중에서 영(0)이 아닌 특이 값에 대응하는 열벡터는 정규 직교 벡터로 모델공간을 정의하며 특이 값 0에 해당하는 벡터는 모델 변화에 독립적이다. 따라서 도출된 모델의 분해능 평가는 모델 A와 B의 경우 각각 \hat{V} 행렬의 1 ~ 2040열, 1 ~ 953열 구간의 데이터만을 사용할 수 있다.

식 (3)에 정의된 의사 역산 연산자 산출과정에서 특이 값이 지나치게 작은 경우 해당 \hat{A}^{-1} 의 원소가 매우 크게 되어 역산이 불안정해 지며, 즉 Jackson의 조건 (c)에 기준하면 도출된 모델의 불확실성이 증폭될 수 있다. 따라서 모델 B의 경우 1 ~ 900열 구간만 사용하였다. 이는 독립적인 데이터 수가 속도 격자 수 보다 작은 과소결정(under-determined) 시스템으로 도출된 속도모형은 식 (1)을 만족하는 많은 모형중의 하나이다.

Jackson이 제시한 조건 (b)에 근거하여 산출된 모델의 고유해에 대한 척도인 $\hat{H}\hat{A}$ 에 의하면 역속도 \hat{s}_j 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\hat{s} = \hat{H}t = \hat{H}\hat{A}s = \hat{R}s \tag{5}$$

이 식에 의하면 산출된 역속도 \hat{s}_j 는 분해능 행렬(resolution matrix) \hat{R} 의 j 행-벡터 r_j 와 역속도 모델 s 와의 곱말기(convolution)이다. 즉 산출된 탄성과 역속도(\hat{s})는 가능한 모든 역속도 벡터(s)를 \hat{R} 의 행벡터의 가중합(weighted sum)으로 해석할 수 있다.

$$\hat{s}_j = \sum_{i=1}^M r_{j,i} \times s_i \tag{6}$$

여기서 행렬 \hat{R} 이 단위행렬이면 \hat{s} 는 고유해 s 가 된다. 따라서 \hat{R} 의 단위행렬에 유사정도가 데이터로부터 도출 가능한 모델 분해능의 척도로 볼 수 있으며 영상의 영역별 분해능은 해당 행의 원소 분포로부터 파악할 수 있다.

4개 격자에 대한 분해능을 고찰하고자 분해능 행렬 \hat{R} 의 4개 행의 원소분포를 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였다. 도표에는 행 번호와 해당 격자의 위치(심도, 수평)를 표시하였다. 즉 Fig. 4에서 행 401은 심도 50 m의 좌측 1 m에 위치한 격자의 분해능을 표시한다.

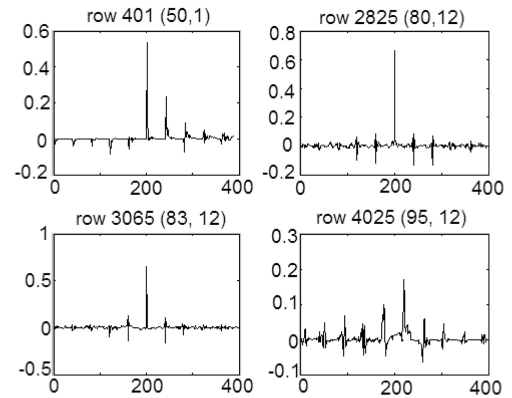


Fig. 4. Rows of the resolution matrix in model A.

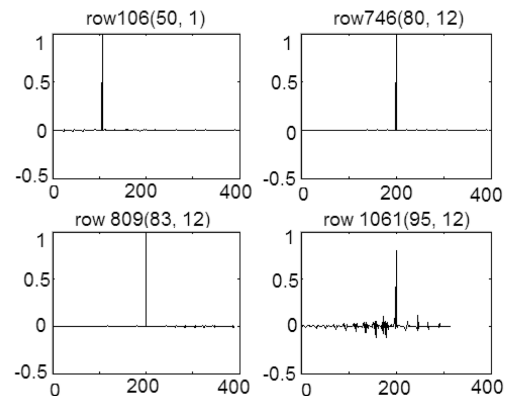


Fig. 5. Rows of the resolution matrix \hat{R} in model B. The coordinates are (vertical, horizontal) distances in meters from the upper left corner of the model.

도시한 구간은 대각 성분 주위 400개 원소이다. 도표의 수직축 값은 식 (6)에서 제시된 인접 격자의 가중치를 나타내는 분해능 행렬 \hat{R} 의 성분이다. 각 도표에서 해당 격자에 좌우로 인접 격자의 가중치는 대각성분 좌우에, 그리고 상하로 인접한 격자의 가중치는 대각성분으로부터 모델 A의 경우는 40, 모델 B는 21을 간격으로 표시된다(여기서 40과 21은 모델의 수평방향 격자수이다). Fig. 4와 Fig. 5로부터 모델 B의 분해능이 상대적으로 우수한 것을 쉽게 판단할 수 있다.

이 도표에서 보면, 격자(80, 12)와 (83, 12)는 대각성분이 매우 우세하게 보이고 있다. 따라서 속도영상의 이 위치의 속도 값은 상대적으로 신뢰도가 높다고 할 수 있으며 (95, 12) 위치에서 표출된 속도 값에 대한 신뢰도는 상대적으로 낮다고 볼 수 있다. 격자 (80, 12)와 (83, 12)는 Fig. 1에서 터널로 해석된 저속도 구간에 해당한다. 탐사목적에 해당하는 국부적인 관심 영역에 대한 신뢰도 평가는 분해능 행렬의 해당 행벡터의 원소 분포를 관찰함으로써 가능하다고 할 수 있다.

불확실성 분석

도출된 모델 값의 불확실성의 척도로 Jackson의 조건 (c)에서 정의된 모델의 분산을 산출하였다. 시스템행렬에 의한 모델 (\hat{s}_k) 분산 효과를 검토하기 위하여 데이터의 초동발체 오차가 모든 데이터에서 크게 다르지 않다는 가정으로 데이터의 분산 $var(\hat{t}_i)$ 의 계수 $\sum_{i=1}^N \hat{H}_{ki}^2$ 를 계산하였다(Fig. 6). 여기서 고려 대상인 속도격자는 Fig. 2에서 제시한 구간인 투과 파선수가 25 이상인 격자들이다.

분산계수의 평균은 모델 A와 B에서 각각 $0.32 (1/m^2)$ 와 $0.34 (1/m^2)$ 이며 투사된 파선수가 많은 구간의 분산 값은 대부분 $0.3 (1/m^2)$ 이하이며 Fig. 4에서 관찰한 구간인 (50, 1), (80, 12), (83, 12), (95, 12)에서의 모델 A의 분산 계수는 각각 0.28, 0.31, 0.30, 0.35이다. 모델 A와 모델 B의 분산계수 분포는 속도모델 하단부(심부)에서 모델 A의 분산이 모델 B보다 다소 작게 나타난다. 모델 B의 분산이 다소 크게 산출된 이유는 사용된 특이 값의 범위 때문이라고 추정할 수 있다. 이 분석에서

사용한 모델 A와 B의 특이 값의(최소/최대) 비가 각각 0.009와 0.005이다. B의 경우 상대적으로 다소 작은 특이 값을 포함한 것이다. 도출된 모델의 불확실성을 원하는 수준으로 제한하려면 지나치게 적은 특이 값에 해당하는 자료는 제외하는 것이 바람직하다.

결론

선형시스템의 역산이론을 시추공 탄성과 주시 토모그래피 속도영상의 영역별 신뢰도 평가 척도로 사용 가능성을 검토하기 위하여, 주시 토모그래피 결과 도출된 속도모델 상에서 파선추적을 통하여 데이터(측정주시)벡터 공간과 모델(속도 격자) 벡터공간을 연관 짓는 시스템 행렬을 산출하고 이에 대한 분석을 수행하였다. 분석 대상은 SIRT법에 의하여 도출된 모델이고 영상 평가에 사용한 정보는 모델의 분해능과 파선과 격자의 결합도이다.

적용실험은 격자의 크기가 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ (모델 A)와 $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ (모델 B) 두 개의 속도모델을 사용하였다. 동일한 측정 자료의 경우 모델 격자수를 줄이면 데이터/모델매개변수의 비가 증가하여 격자와 파선의 결합 상태가 증진되어 분해능이 개선될 것이다. 이 연구의 시스템 행렬 분석결과에 의하면 통계적으로 독립적인 데이터 수는 모델 A의 경우 2040개이고 모델 B의 경우는 953개이다. 즉 격자수는 1/4로 감소한 반면 독립적인 데이터 수 또한 대략 1/2 이하로 감소하였다. 따라서 격자크기에 따른 파선과 격자의 결합상태는 속도격자수와 고유 값이 0보다 큰 특이 값 수의 비율로 보는 것이 타당할 것으로 생각할 수 있다.

각 속도모델에서 상단부와 하단부 그리고 탐사 관심구간인 터널 부근 등을 포함하는 4개의 격자를 선택하여 이들에 대한 분해능과 분산을 계산하였다. 산출 결과 대응하는 격자에 대한 분해능은 두 번째 모델이 우수하고 분산은 모델 최심부에서 첫 번째 모델이 다소 낮게 나타난다. 즉, 모델 B는 파선과의 결합상태가 우수한 격자에서 높은 분해능을 보이는 반면, 모델

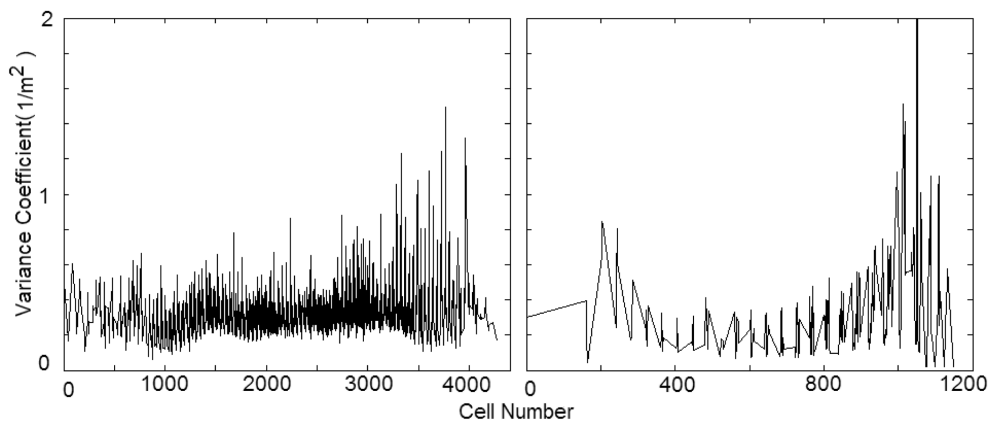


Fig. 6. Variance coefficient of the slowness model A (left) and B (right).

A는 비교적 낮은 분산으로 모델의 불확실성 측면에서 우수한 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 방법으로 토모그래피 영상해석 시 영역별 파선밀도, 분해능, 불확실성 등에 대한 정량화 척도를 사용함으로써 해석 결과에 대한 신뢰도를 증진 시킬 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 한성대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

이두성, 2003, 임펄시브 진원에 의한 공대공 탄성파기록으로부터 P파, S파 속도영상 도출에 관한연구, 물리탐사, **6**(3), 138-

142.2

이두성, 2007, 초동발체를 위한 탄성과 신호분석연구, 물리탐사, **10**(2), 130-136.

이두성, 2009, 초동 주시 측정 오차로 제어된 공대공 주시 토모그래피 사례연구, 물리탐사, **12**(3), 233-238.

Jackson, D. D., 1972, Interpretation of inaccurate, Insufficient and Inconsistent Data, *Gephys. J. of Royal Astr.*, **28**, 97-109.

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.

Lines, L. R. and S. Treitel, 1984, Tutorial A Review of Least_Squares Inversion and Its Application to Geophysical Problems, *Geophysical Prospecting*, **32**, 159-186.

Penrose, R., 1955, A generalized inverse for matrices, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **51**, 406-413.

Wiggins, R. A., 1972, The General Linear Inverse Problem: Implication of Surface Waves and Free Oscillations for Earth Structure, *Review of Geophysics and Space Physics*, **10**(1), 251-285.