

프레넬 볼륨을 이용한 3차원 탄성과 주시 토모그래피

고광범¹⁾ · 이두성²⁾

3D Seismic Travel-time Tomography using Fresnel Volume

Kwang Beom Ko¹⁾ and Doo Sung Lee²⁾

요 약 : 프레넬 볼륨을 이용하는 3차원 탄성과 주시 토모그래피 기법을 개발하고 수치자료를 이용하여 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 3차원 주시 토모그래피 기법의 현장자료에의 적용성을 고찰하고자 시추공 간 탄성과 현장자료에 대한 주파수 특성 및 송수신 배열 커버리지를 검토하여 약 8m의 분해능의 3차원 입방체의 속도정보를 도출하였다. 3차원 속도분포를 기존의 2차원 토모그램과 비교하였을 때 두 결과가 잘 일치함을 확인함으로써 3차원 토모그래피 알고리즘의 현장 적용성을 확인하였다.

주요어 : 3차원 탄성과 주시 토모그래피, 프레넬 볼륨, 커버리지

Abstract : 3D seismic travel-time tomography algorithm based on Fresnel volume was developed and its feasibility was investigated by the numerical experiments. To testify the field applicability of the developed algorithm, frequency characteristics and array coverage of the crosshole seismic raw data were investigated and 3D velocity tomogram cube with about 8m spatial resolution was obtained. When compared this 3D velocity cube with the conventional 2D ray tomogram, two results were matched well. We concluded that 3D seismic tomography algorithm developed in this study has enough potential to the field application.

Keywords : 3D seismic travel-time tomography, Fresnel volume, coverage

서 론

고분해능 속도 영상단면을 제공하는 탄성과 토모그래피에 관련된 국내 기술은 성숙단계 수준에 접어들었으며 지반조사 분야에의 현장적용이 활발하다. 현재 국내에서의 탄성과 토모그래피는 지표 및 시추공 송수신 배열에 의한 2차원 파선 토모그래피 기법이 주종을 이루고 있다. 그러나 지질구조는 근본적으로 3차원이며 따라서 지질구조를 보다 정밀하게 규명하기 위해서는, 주시 토모그래피의 경우, 조사 대상 영역에 대한 3차원 속도분포 정보가 요구되는 반면 통상의 탄성과 토모그래피는 송수신원 간 단면에 대한 2차원 속도분포만을 제공하므로 3차원적으로 변화하는 지질구조 양상을 규명하는 데는 한계가 있다. 따라서 대상영역에 대한 3차원 속도 입방체를 효과적으로 도출할 수 있는 3차원 탄성과 주시 토모그래피 기법의 개발 및 적용성에 대한 고찰이 필요한 시점이라 생각된다.

규명하고자 하는 조사 영역이 3차원일 때, 즉 입방체에 대한 속도분포 정보가 요구될 경우, 통상의 탄성과 주시 토모그래피의 성공 여부는 입방체의 3차원 정보를 정확히 도출할 수 있을 정도의 충분한 송수신 커버리지를 가지는 현장자료를 획득

할 수 있는가에 좌우된다. 그러나 지표 및 시추공을 이용하는 일반적인 자료획득 현장조건 등 여러 여건을 감안하였을 때 극히 제한된 송수신 커버리지를 가지는 자료를 획득하게 됨이 일반적이다. 이는 곧 입방체 내 파선이 전혀 통과하지 않는 영역이 생김을 말하며 결과적으로 통상적인 파선 토모그래피 기법으로서는 3차원 정확한 속도정보의 도출은 매우 어려움을 뜻한다. 그러나 이는 바꾸어 말하면, 만일 파선 대신 적절한 파선 확장 기법을 도입함으로써 제한된 송수신 커버리지를 가지는 탄성과 자료의 경우에도 성공적으로 3차원 속도분포를 재구성할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 제한된 커버리지를 가지는 탄성과 자료로부터 3차원 속도분포를 도출하기 위해 프레넬 볼륨에 기반을 3차원 탄성과 주시 토모그래피 기법을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 수치자료 및 시추공 간 탄성과 현장자료에 적용함으로써 알고리즘의 타당성 및 적용성을 살펴보고자 하였다. 알고리즘의 검증을 위하여 수치자료를 통한 프레넬 볼륨의 커버리지 및 분해능 분석과 고립형 이상체 입방체 모델에 대한 3차원 토모그램을 작성하고 이를 검토하였다. 최종적으로 현장에서 획득한 시추공 간 탄성과 자료에 대하여 이를 이용한 3차원

*2003년 5월 2일 접수

1) 한성대학교 영상화기술 연구실

2) 한성대학교 소프트웨어시스템 공학

입방체의 속도정보를 도출하고 이를 기존의 2차원 토모그래프 결과와 상호 비교함으로써 3차원 토모그래피 알고리즘의 현장 적용성을 고찰하였다.

프레넬 볼륨을 이용한 3차원 탄성과 토모그래피

주시를 이용하는 토모그래피 기법을 이용하여 시추공 간 입방체의 3차원 속도정보를 도출하고자 할 때 부딪치는 실제적인 어려움 중 하나는 조사하고자 하는 대상 입방체에 대한 충분한 송수신 커버리지를 가지는 탄성과 자료가 요구되나 현실적으로는 획득한 자료의 총 커버리지는 가용 시추공 수의 제한 등 입방체의 3차원 속도정보를 성공적으로 재구성하기에는 불충분하다는 점을 들 수 있다. 이는 곧, 제한된 커버리지의 탄성과 자료로부터 조사하고자 하는 입방체의 속도정보를 효과적으로 도출하기 위해서는 파선 폭을 확장하는 방법이 요구됨을 의미한다. 파선 폭의 확장에는 주파수 대역폭을 가지는 탄성과 자료의 특성을 고려할 때 파동경로(wave-path)와 등가인 프레넬 볼륨을 이용하는 것이 가장 자연스러운 접근 방법일 것이다.

탄성과 자료는 근본적으로 주파수 대역폭을 가지며 이 경우 탄성과의 전파는 파선경로보다는 파동경로를 따른다고 알려졌다(Cervený and Soares, 1992). 이러한 파동경로는 프레넬 볼륨으로 정의되며 Fig. 1의 경우, 송수신원 위치(A 및 B)에 따른 탄성과의 전파시간 및 주파수의 함수로서 다음과 같이 표현된다(Cervený and Soares, 1992).

$$|\tau(F, A) + \tau(F, B) - \tau(B, A)| \leq \frac{1}{2}T \quad (1)$$

여기서 τ 는 두 지점 간 탄성과의 전파시간, T 는 탄성과의 주 주기를 나타낸다. Fig. 1에서 송수신원(A 및 B)간 파선경로 상의 한 점 O_F 에서 파선경로에 수직인 단면상에서 식 (1)을 만

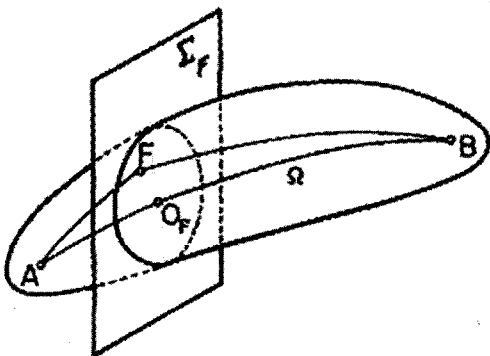


Fig. 1. Schematic presentation of a Fresnel volume for a point source at A and receiver at B. The cross-section of the Fresnel volume by a plane Σ_F perpendicular to the ray at a point O_F represents the first Fresnel zone at O_F . The point F belongs to the Fresnel volume if and only if it satisfies equation (1) (After Cervený and Soares, 1992).

족하는 임의의 점 F의 집합은 프레넬 볼륨을 이루며 단면상에 교차하는 면적은 O_F 에서의 일차 프레넬 영역에 해당한다. 이러한 프레넬 볼륨을 도출하는 연구 사례로서 포물형 파선근사(paraxial ray approximation)에 의한 방법(Cervený and Soares, 1992) 및 송수신원 간 상반성을 이용하는 방법(Watanabe et al., 1998) 등이 제시된 바 있다. 본 연구에서는 프레넬 볼륨의 계산 시 상반성(Matsuoka and Ezaka, 1992)을 이용하는 방법을 채택하였다. 이 경우 송수신원 및 3차원 매질 내 임의의 지점 간 주시를 구하는 과정이 필요하며 이에 parametrized ray shooting 알고리즘(Sun, 1991)을 이용하였다.

한편 프레넬 볼륨을 이용하는 주시 토모그래피 기법에 관한 연구로서는 파동경로와 등가인 감도함수를 이용하는 방법(Vasco et al., 1995)과 프레넬 볼륨 내 임의의 위치에서의 주시에 따라 선형적인 가중치를 부여하는 방법(Watanabe et al., 1998) 등이 발표된 바 있다. 프레넬 볼륨을 이용하는 상기 주시 토모그래피 기법들은 파선경로에 대한 선적분으로 표현되는 파선 토모그래피 기법을 파동경로와 등가인 프레넬 볼륨에 대한 공간적분 문제로 일반화시킨 점에서 근본적으로 동등하며 프레넬 볼륨에 가중치를 부여하는 방식에 따라 방법론적인 차이점을 가진다.

프레넬 볼륨은 주파수의 제곱근에 반비례하므로(Cervený and Soares, 1992) 고주파수 극한을 취할 경우 프레넬 볼륨은 송수신원 간 파선경로와 동등하게 된다. Vasco 등(1995)은 이에 근거하여 파선경로 상 임의의 지점에 대한 일차 프레넬 영역의 면적으로 정규화시켜 파동경로와 등가인 프레넬 감도함수를 도출하고 이를 이용하는 주시 토모그래피 기법을 제안한 반면에, Watanabe 등(1998)은 프레넬 볼륨 내 임의의 위치에서 식 (1)의 주시에 따라 선형적으로 변화하는 가중치를 부여하는 방법을 제시하였다. 이 경우 프레넬 볼륨의 고주파수 극한에 해당하는 파선경로 상에서 가장 큰 가중치를 가지며 파선경로에서 멀어질수록 선형적으로 가중치가 감소하게 된다. 본 연구에서는 파선 폭의 확장 측면을 감안하여 Watanabe 등(1998)이 제시한 방법을 채택하였다. 이때 역속도는 발체초동으로 정규화한 초동주시 잔차를 프레넬 볼륨에 대응하는 가중치의 가중평균 형태로서 반복적으로 구하게 되며 수식으로는 다음과 같이 표현된다(Watanabe et al., 1998, Appendix).

$$\frac{\Delta S_j^k}{S_j^{k+1}} = \sum_{i=1}^N \frac{w_{ij} \Delta T_i}{T_i^{obs}} / \sum_{i=1}^N w_{ij} \quad (2)$$

여기서, w_{ij} 는 j 번째 셀에 대한 i 번째 프레넬 볼륨 가중치, S_j^k 는 k 번째 반복 단계에서의 매질의 역속도이며 ΔT_i 및 T_i^{obs} 는 각각 송수신원 사이의 주시 잔차 및 발체 초동주시이다.

프레넬 볼륨의 결정 및 수치자료에의 적용

식 (1)로 표현되는 프레넬 볼륨은 매질의 속도 및 송수신원

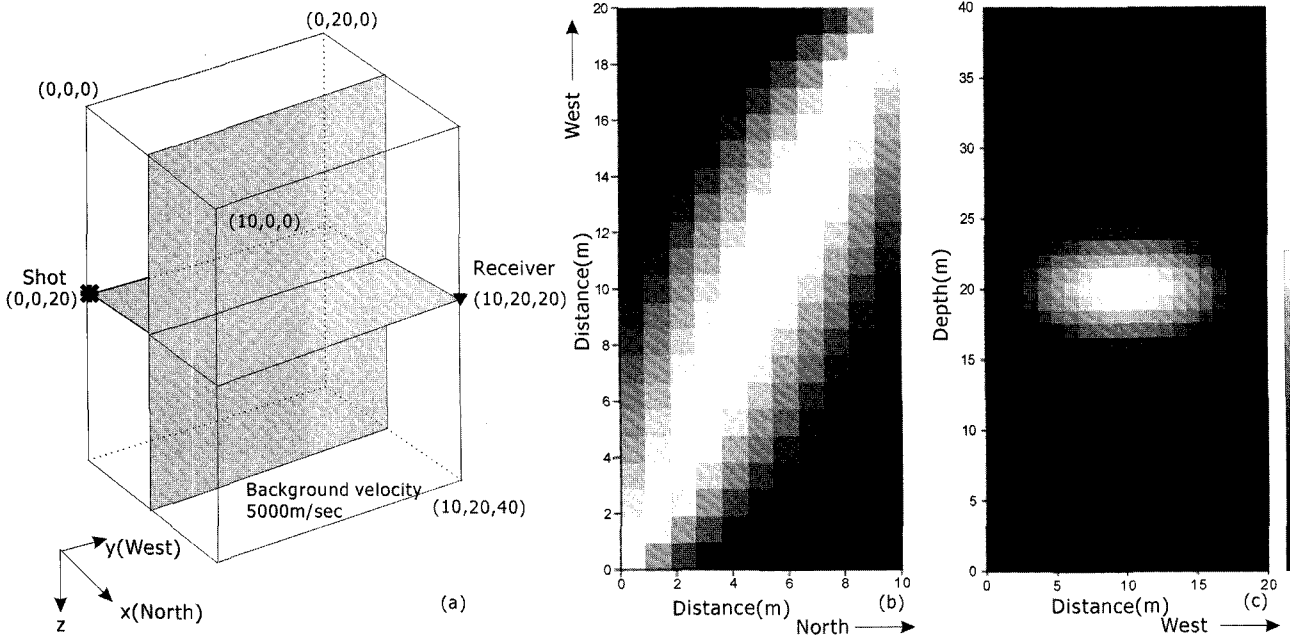


Fig. 2. Fresnel volume and its corresponding weighting values with the frequency of 1000 Hz in a 3D homogeneous medium (velocity 5000 m/sec). Shot is located at (0,0,20) and receiver at (10,20,20). (a) 3D homogeneous velocity model, (b) the horizontal cross-section and (c) the vertical cross-section of the Fresnel volume for slice as shown in Fig. 2a.

위치 뿐만 아니라 주파수의 함수로서 그의 크기는 주파수의 제곱근에 반비례한다. 즉, 낮은 주파수의 프레넬 볼륨을 이용하면 큰 커버리지 확장효과를 가지나 3차원 토모그래프의 분해능은 낮아져 결과적으로 평활화된 속도분포를 내게 된다. 반대로 고주파수의 프레넬 볼륨은 상대적으로 높은 분해능을 가지나 커버리지 확장정도가 낮아 입방체 내 파선이 전혀 통과하지 못하는 영역이 존재할 가능성이 커진다. 따라서 프레넬 볼륨 계산 시 적정 주파수를 선택하는 것은 상호 trade-off 관계에 있는 토모그래프의 분해능과 커버리지를 좌우한다는 점에서 대단히 중요하며 이는 곧 송수신 위치, 매질의 속도 및 주파수의 함수인 일차 프레넬 영역의 적정 크기를 결정하는 것과 동등하다. 결론적으로 3차원 탄성과 주시 토모그래피에서 프레넬 볼륨을 계산하기 위해서 적절한 주파수를 선택한다는 것은 제한된 커버리지의 획득자료로부터 가능한 고분해능의 3차원 속도정보를 도출하면서, 커버리지를 최대한 확장하는 문제로 귀결된다.

프레넬 볼륨 계산 시 적절한 주파수의 선택은 획득자료의 주파수 특성을 고찰하고 이를 통해 여러 주파수에 대하여 송수신 커버리지를 검토하여 결정함이 바람직하다. 본 연구에서 사용한 시추공간 탄성과 자료 신호의 주파수 대역은 대략 300에서 최대 3000 Hz에 걸쳐 있고 주 주파수는 약 1500 Hz, 매질의 속도분포는 대략 4400 m/sec에서 5200 m/sec의 분포임이 알려졌다(고광범과 이두성, 2003). 따라서 프레넬 볼륨 계산에 있어서 적정 주파수는 1500 Hz 안팎에서 결정함이 타당하며 본 연구에서는 토모그래프의 분해능 보다는 송수신 커버리지의 확장을 우선적으로 감안하여 프레넬 볼륨 계산에서 주파수로

서 1000 Hz를 선택하였다.

본 연구에서는 시추공 간 탄성과 자료의 현장조건을 감안하여 5000 m/sec의 상속도 매질(Fig. 2a)에서 송수신원의 좌표가 각각 (0,0,20) 및 (10,20,20)이고 주 주파수가 1000 Hz인 프레넬 볼륨을 계산하였으며, Fig. 2는 프레넬 볼륨의 수평 및 수직단면을 도시한 결과이다. Fig. 2b와 2c는 각각 심도 20 m에서의 프레넬 볼륨의 수평단면과 수직단면이다. 수평 및 수직단면에서 볼 때 일차 프레넬 영역에 해당하는 프레넬 볼륨의 최대 폭은 약 8 m 정도임을 알 수 있으며 이는 곧 프레넬 볼륨을 이용하는 토모그래피 기법의 분해능을 지시한다. 즉, 이는 암영대가 없는 충분한 커버리지를 가지는 탄성과 자료를 이용한, 재구성되는 토모그래프의 최대 분해능 한계(resolution limit)는 약 8 m임을 의미하며 이는 Schuster(1995)가 제시한 이론적 결과에 잘 부합된다.

한편, 프레넬 볼륨을 이용하는 주시 토모그래피의 총 커버리지는 획득자료의 송수신 배열에 의해 결정된다. 현장자료는 Fig. 3a와 같이 시추공 A와 B(측선 1), 시추공 A와 C(측선 2), 그리고 시추공 B와 D(측선 3)를 잇는 세 개 측선에 대한 시추공 간 배열에 의해 획득하였다. 이러한 배열에 의한 커버리지를 살펴보기 위해 주 주파수 1000 Hz, 각 측선의 심도 20 m에서 송수신원 커버리지에 대한 프레넬 볼륨의 수평 및 수직단면을 Fig. 3b 및 Fig. 3c에 나타내었다. 수평단면의 경우 시추공 C와 D에서의 자료를 획득하지 못한 관계로 약간의 암영대를 보이는 경우를 제외하고는 단면 전 영역에 걸쳐 양호한 커버리지를 가진다. 수직단면의 경우 일차 프레넬 영역은 심도에 따라 약 8 m 정도의 폭을 가짐을 알 수 있으며 수평단면의 경

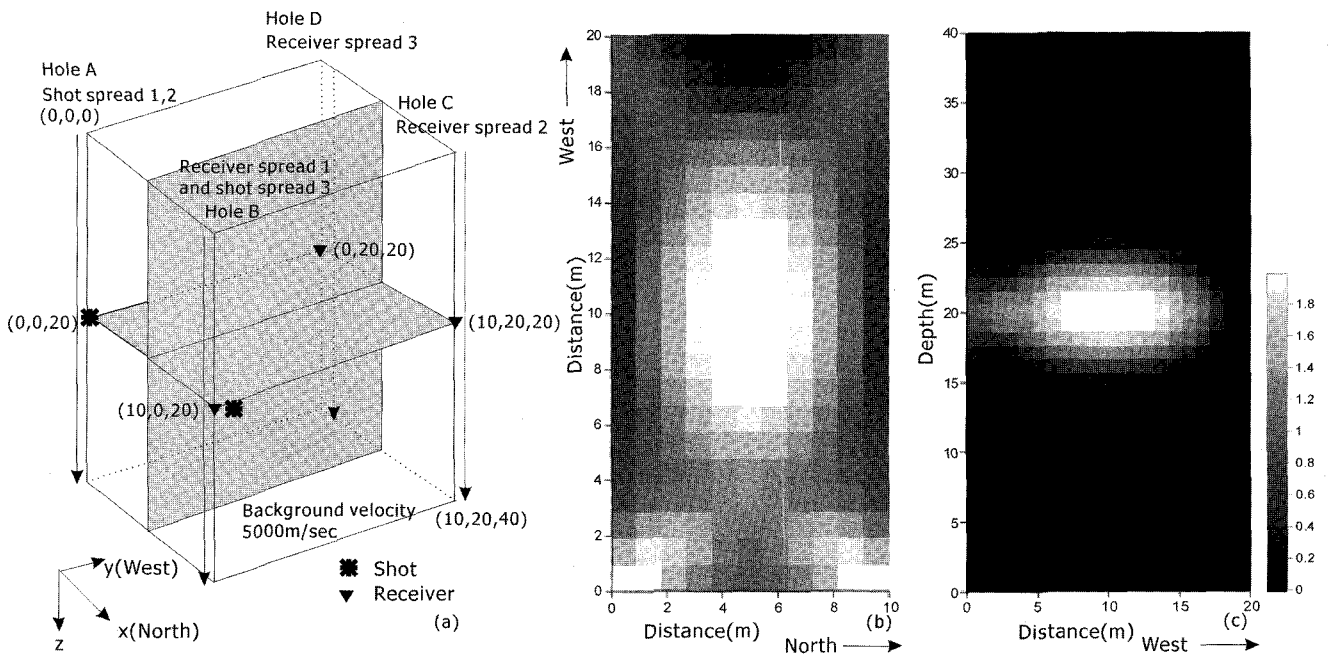


Fig. 3. Assembled Fresnel volume and its corresponding weighting values. Shot and receiver locations are (0,0,20), (10,0,20) for spread 1, (0,0,20), (10,20,20) for spread 2 and (10,0,20), (0,20,20) for spread 3, respectively. (a) Model the same as in Fig. 2a. (b) The assembled horizontal cross-section and (c) the assembled vertical cross-section of the Fresnel volume.

우와 마찬가지로 시추공 C와 D 사이의 영역에서 다소의 압영
대를 가진다. 프레넬 볼륨의 총 커버리지는 세 축선의 모든 송

수신 배열의 총합으로서 전체적으로는 양호한 커버리지로 성
공적으로 확장되었음을 보여준다.

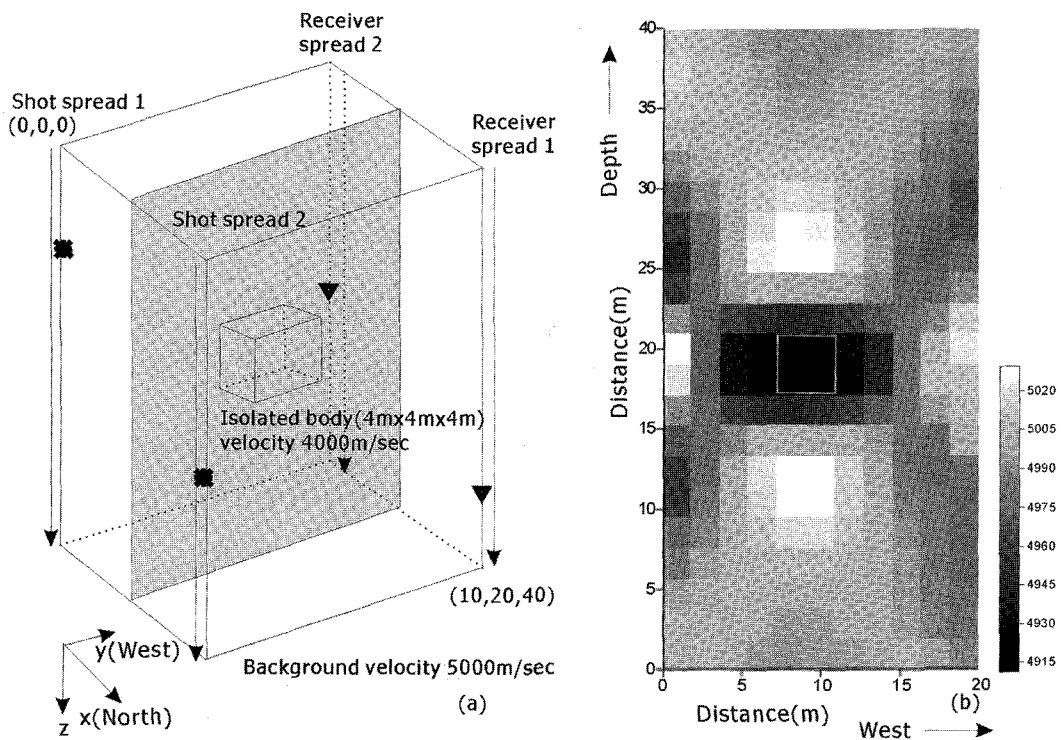


Fig. 4. Result of numerical experiment for the verification of the 3D travelt ime tomography algorithm. (a) Isolated velocity model (velocity 4000 m/sec, 4m x 4m x 4m) in a homogeneous medium with velocity 5000 m/sec. (b) Reconstructed vertical velocity distribution of vertical slice section as shown in Fig. 4a.

프레넬 볼륨을 이용하는 3차원 토모그래피 알고리즘을 검증하고자 수치자료에 대해서 적용한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4a는 배경매질의 속도가 5000 m/sec이고 입방체의 중앙부에 한 번의 크기가 4 m인 4000 m/sec의 고립형 이상체를 가지는 모델이다. 검증에 이용된 자료는 길이 20 m인 두 개의 송수신 배열로서 송신공 A 및 수신공 C, 그리고 송신공 B 및 수신공 D의 두 축선에서 송수신 2 m 간격으로 얻은 총 42개의 이론 초동자료이다. Fig. 4b는 초기속도를 배경매질과 같은 5000 m/sec로 하여 10회 반복을 거친 토모그램 입방체의 수직 단면을 도시한 결과이다. 수평방향의 분해능이 상대적으로 낮은 시추공 간 자료의 특성으로 인하여 수평방향으로 다소 평활화 되었으나 소규모 고립형 이상체(Fig. 4b 사각형 표시)의 양상은 성공적으로 영상화 되었다.

현장자료에의 적용

프레넬 볼륨에 의한 3차원 탄성과 주시 토모그래피는 그 특성상 규명하고자 하는 입방체에 대하여 획득자료가 어느 정도의 유효한 커버리지를 가지는가가 매우 중요하다. 즉, 통상의 2차원 시추공 간 토모그래피는 송수신 시추공에서 조밀한 송수신 간격에 의한 자료를 획득하는 것으로 유효 커버리지 확보가 가능한 반면, 3차원 주시 토모그래피는 이와는 달리 얼마나 다양한 각도에서 탄성파자료를 획득했는지가 더욱 중요한 관점이 된다. 따라서 3차원 주시 토모그래피 적용을 위한 탄성과 자료는 가능한 다양한 배열(현장조건에 따라 지표, 시추공 간 혼합 송수신 배열)을 적용하는 것이 필수적이다.

프레넬 볼륨을 이용하는 3차원 토모그래피 기법의 현장자료에의 적용성을 검토해 보자 국내에서 획득한 현장자료에 적용하여 보았다. 본 연구의 현장자료는 Fig. 3a와 동일한 축선 배열로서 조사 입방체 내 송신 시추공 3곳과 수신 시추공 3곳

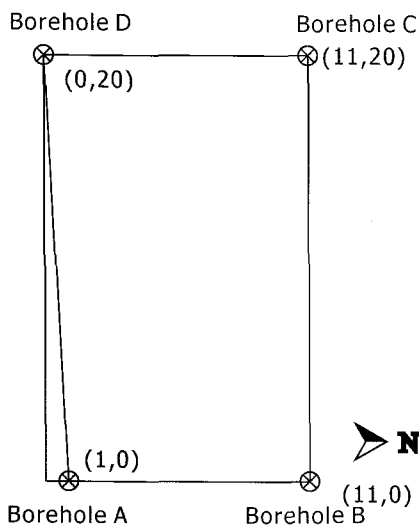


Fig. 5. Plan view of crosshole seismic survey.

Table 1. Seismic crosshole data acquisition parameters

· Survey : Crosshole seismic array consisted of 3 spread.
· Data recording equipment : DAS-1™
· Crosshole data acquisition parameter setup
· Source : Sparker™
· Receiver : 12 channel hydrophone
· Sampling rate and record length : 0.5 msec and 0.5 sec
· Receiver spacing : 0.5 m
· Shot spacing : 0.5 m
· Spread parameter setup in 3D travel-time tomography
· Shot and receiver interval : 4 m interval.
· Spread 1 (borehole A and B)
· Shot and receiver spread : 60 m~100 m and 60 m~88 m.
· Number of traces used in 3D tomography : 88 traces.
· Spread 2 (borehole A and C)
· Shot and receiver spread : 60 m~100 m and 60 m~92 m.
· Number of traces used in 3D tomography : 99 traces.
· Spread 3 (borehole B and D)
· Shot and receiver spread : 60 m~92 m and 60 m~92 m.
· Number of traces used in 3D tomography : 81 traces.

에서 이루어진 세 단면 시추공 간 탄성과 획득자료이다. 각 시추공에 대한 위치정보는 Fig. 5의 평면도 상에 도시하였으며 자료획득 및 3차원 입방체 토모그램 도출에 사용된 각 변수를 테이블 1에 요약하였다. 입방체의 voxel 크기는 분해능 및 계산시간을 감안하여 한 번당 길이를 2 m로 설정하였으며 3차원 주시 토모그래피에 사용된 탄성과 초동 주시자료의 개수는 다중경로 효과를 가지는 프레넬 볼륨의 커버리지를 고려하여 송수신 간격 모두 4 m의 자료를 이용하였다.

입방체의 속도 검증을 위해 송신 시추공 A 및 수신 시추공 B에서 획득한 시추공 간 탄성과 획득자료에 대한 2차원 토모그래피 패키지 EZTOMO(신동훈 등, 2002)에 의한 결과를 Fig. 6a에 비교하여 도시하였다. 프레넬 볼륨을 이용하는 토모그래피의 경우 속도분포가 다소 평활화되는 양상을 보이나 전체적으로는 상호 잘 부합되는 결과를 보여주고 있음을 알 수 있으며 두 결과 모두 Fig. 6b에 나타난 바와 같이, 대응하는 시추공 간 탄성과 자료의 0m 수직오프셋 자료에서의 초동의 심도에 따른 변이양상과도 잘 일치한다. 부가하여 Fig. 6a의 수신 시추공 B의 심도 96m 이후에 나타나는 약간의 압영대(초기속도 5000 m/sec를 주었음)를 제외하고는 결론적으로 이상의 검토로부터 조사 대상지역 입방체의 3차원 속도정보는 성공적으로 재구성되었다고 판단된다.

Fig. 7a는 Flexvox(김현규와 이두성, 2003)를 이용하여 3차원으로 시각화하여 나타낸 것이며 Fig. 7b는 입방체의 3차원 속도분포를 자세히 살펴보기 위하여 수평 및 수직단면으로 시각화한 속도분포 단면이다. 입방체 및 속도단면을 살펴보았을 때 심도 60 m에서 80 m까지는 시추공 A에서 시추공 C 방향(남동에서 북서방향)으로 속도가 증가하는 양상을 보이며 심도 80 m에서 100 m까지는 동쪽에서 서쪽방향으로 점진적으로 감

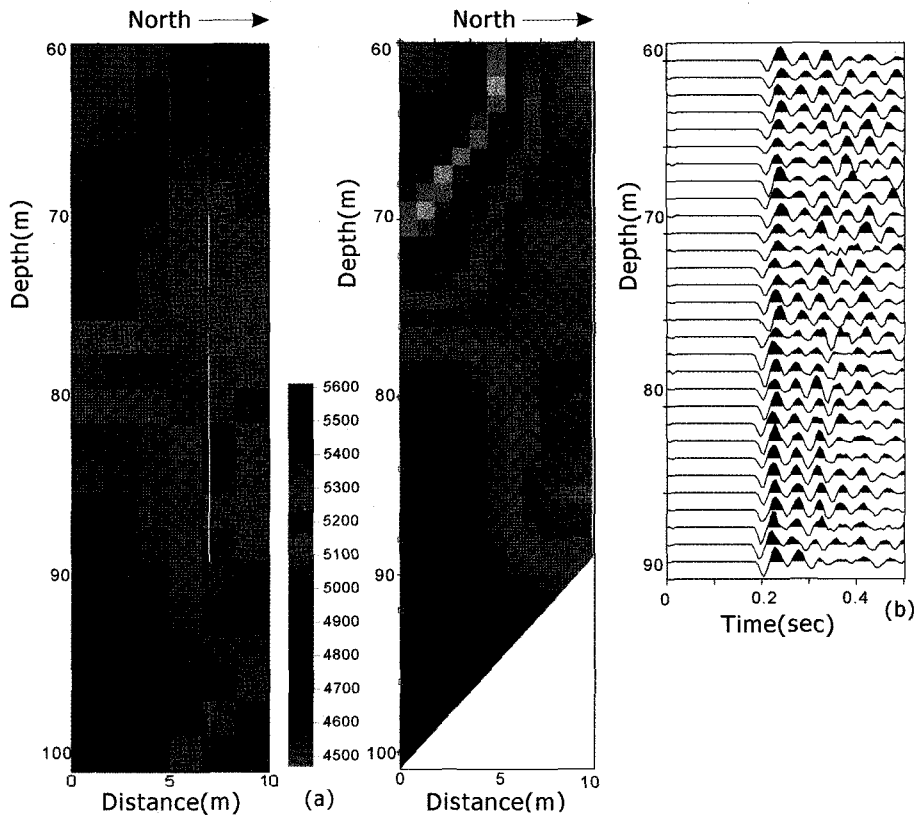


Fig. 6. Comparison of the tomogram for spread 1 (borehole A and B). (a) The reconstructed tomogram by 3D traveltome tomography (left) and conventional 2D ray tomography (right). (b) Corresponding 0 m vertical offset crosshole seismic data.

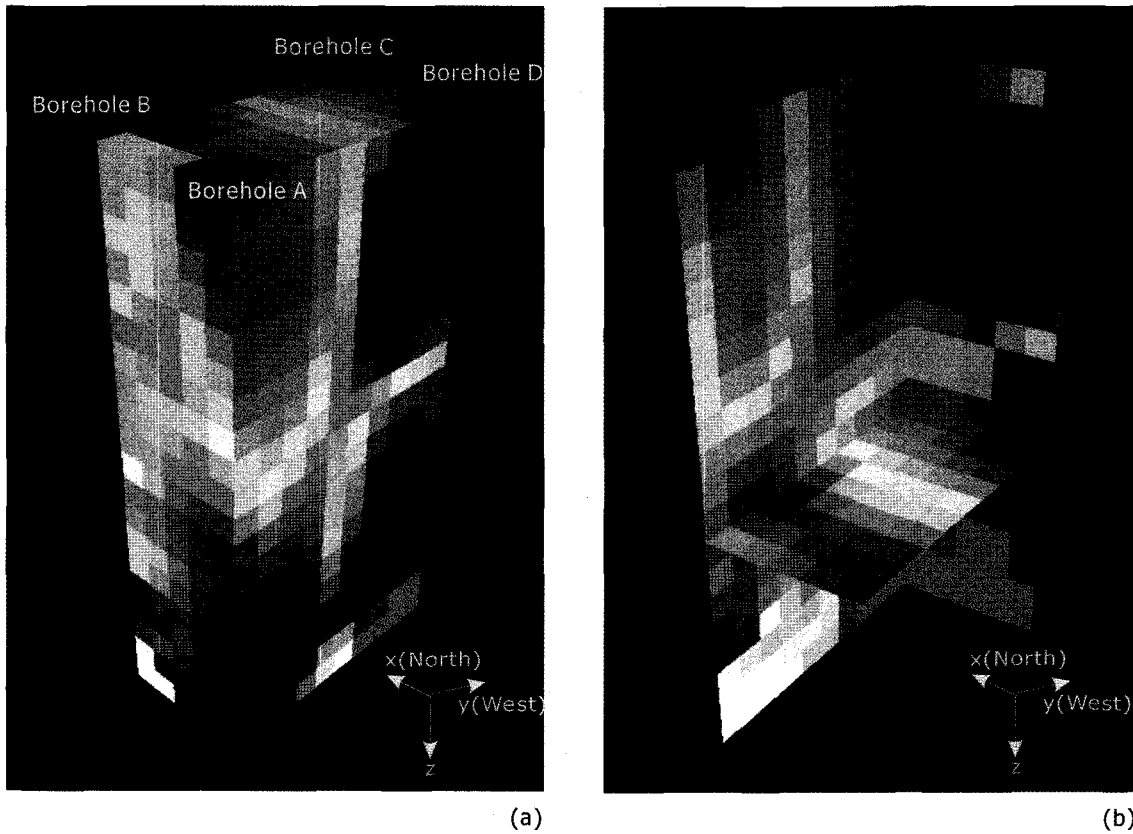


Fig. 7. The result of the 3D traveltome tomography. Velocity distribution ranges from 4200 m/sec (blue) to 6000 m/sec (red color). (a) Volume visualization of the reconstructed velocity cube. (b) Slice visualization of the velocity cube for the interpretation.

소하는 속도분포를 보여주고 있다.

결 론

현재 국내에서 활발히 적용되는 탄성과 토모그래피는 2차원 파선 토모그래피가 주종을 이루고 있다. 2차원 탄성과 토모그래피 기법은 근본적으로 3차원인 지하구조 규명에는 정보량이 미흡하며 보다 정량적인 해석을 위해서는 3차원 탄성과 토모그래피 기법이 요구된다.

본 연구에서는 제한된 송수신 배열 커버리지를 가지는 탄성과 자료로부터 3차원 입방체의 속도정보를 효과적으로 도출할 수 있는 3차원 탄성과 주시 토모그래피 기법을 개발하였다. 탄성과 자료의 제한된 커버리지 문제를 해결하기 위한 파선 폭 확장기법으로서 프레넬 볼륨을 이용하였으며 수치자료를 이용하여 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

프레넬 볼륨에 의한 3차원 탄성과 주시 토모그래피는 그 특성상 조사 대상 입방체에 대한 유효 커버리지와 관련하여 얼마나 다양한 각도에서 탄성과자료를 획득했는 지가 매우 중요하다. 본 연구에서는 3차원 주시 토모그래피 기법의 현장 적용성을 고찰하고자 3쌍의 시추공 간 탄성과 현장자료에 대한 주파수 특성 및 송수신 배열 커버리지를 검토하여 약 8m의 분해능의 3차원 입방체의 속도정보를 도출하였다. 이를 3차원 속도분포를 기존의 2차원 토모그래피와 비교하였을 때 두 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 다양한 각도에 대한 자료 획득으로 조사 대상 입방체에 대한 충분한 커버리지를 확보할 경우, 3차원 탄성과 주시 토모그래피는 충분한 현장 적용성을 가진다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL) 과제 “탄성과 영상화 연구개발 및 응용”의 일부로서 수행되었다. 한국과학기술기획평가원(KISTEP)의 재정지원에 감사를 드린다.

참고문헌

- 고광범, 이두성, 2003, 경암 내 소규모 공동탐지를 위한 시추공 간 탄성과탐사 기법의 적용성 연구: 물리탐사, in press.
- 김현규, 이두성, 2003, PC 기반의 3차원 탄성과 자료 시각화 소프트웨어 개발연구 : 물리탐사, **6**, 35-39.
- 신동훈, 고광범, 박재우, 지준, 이두성, 2002, 리눅스용 GUI 시추공 탄성과 토모그래피 시스템 개발: 물리탐사, **5**, 150-156.
- Červený, V. and Soares, J. E. P., 1992, Fresnel volume ray tracing: *Geophysics*, **57**, 902-915.
- Matsuoka, T. and Ezaka, T., 1992, Ray-tracing using recipro-

city: *Geophysics*, **57**, 326-333.

Schuster, G. T., 1995, Fracture resolution limits for crosswell migration and traveltine tomography: Theory: *3rd SEGJ/SEG International Symposium*, 86-93.

Sun, Y., 1991, Ray tracing in general 3-D media by iterative methods: *University of Utah Tomography Development Project, 1990 Annual report*, 124-166.

Vasco, D. W., Peterson, J. E., and Majer, E. L., 1995, Beyond ray tomography: Wavepaths and Fresnel volumes: *Geophysics*, **60**, 1790-1804.

Watanabe, T., Fujimoto, M., and Ashida, Y., 1998, Seismic tomography by use of Fresnel volume: *Proceedings of the 4th SEGJ International Symposium*, 123-128.

Appendix

파선이론에서 탄성과 주시, T 는 역속도 S 와 파선경로 L 로서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{T}{S} = L \tag{A-1}$$

이로부터 매질 내 역속도 변화량, ΔS 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta T}{T} \tag{A-2}$$

따라서 프레넬 볼륨에 근거한 주시 토모그래피는 조사 대상 입방체를 다수의 voxel로 분할하였을 때 j 번째 voxel의 역속도 변화량 ΔS_j 는 대응하는 프레넬 볼륨의 가중치, w_j 에 대하여 다음의 비례관계로 정의할 수 있다.

$$\frac{\Delta S_j}{S_j^{true}} = \frac{w_j \Delta T}{T^{obs}} \tag{A-3}$$

여기서, $\Delta T = T^{obs} - T^{cal}$ 로서 현장자료(T^{obs})와 이론적으로 구한 초동(T^{cal}) 사이의 잔차이다. 따라서 3차원 주시 토모그래피에 의한 입방체 속도분포는 위 식으로부터 발체초동으로 정규화한 초동주시 잔차를 프레넬 볼륨에 대응하는 가중치의 가중평균 형태로서 다음과 같이 반복적으로 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta S_j^k}{S_j^{k+1}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{w_{ij} \Delta T_i}{T_i^{obs}}}{\sum_{i=1}^N w_{ij}} \tag{A-4}$$

여기서, w_{ij} 는 j 번째 셀에 대한 i 번째 프레넬 볼륨 가중치, S_j^k 는 k 번째 반복 단계에서의 매질의 역속도이며 ΔT_i 및 T_i^{obs} 는 각각 송수신원 사이의 주시 잔차 및 발체 초동주시이다.