물리탐사
Vol. 5, No. 3, 2002, p. 150~156

리눅스용 GUI 시추공 탄성파 토모그래피 프로그램 개발

신동훈[1] · 고광범[1] · 박재우[1] · 지준[2] · 이두성[2]

Development of a GUI Crosswell Seismic Tomography Software on Linux

Dong-Hoon Sheen[1], Kwang Beom Ko[1], Jae-Woo Park[1], Jun Ji[2] and Doo-Sung Lee[2]

요 약 : 본 연구에서는 현장에서도 쉽게 시추공 탄성파 토모그래피를 얻을 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 토모그래피 소프트웨어는 초동의 발췌 및 보정, 시추공 주시 토모그래피 모듈, 그리고 영상화 모듈로 구성되었다. 발췌한 초동을 탄성파 자료의 헤더에 저장함으로써, 초동을 보정하거나 시추공 주시토모그래피의 계산과정에서 부가적으로 초동을 발췌하지 않고 탄성파자료 입력만으로 자료처리를 수행할 수 있도록 하였다. 계산 후에는 영상화모듈을 통해 속도구조와 파선경로를 확인할 수 있다. 이 소프트웨어는 리눅스 환경에서 SU를 기반으로 개발되었으며, 사용에 용이한 GUI환경으로 제작하여 현장자료의 검토 및 초동 발췌, 발췌된 초동오차를 검토 및 보정의 용이성, 주시토모그래피의 생성 등 토모그래피 탐사법의 효용성을 향상시켰다.

주요어 : 시추공 탄성파 토모그래피, 영상화 모듈, 속도구조, 파선경로

Abstract : In this study, a software for crosswell seismic tomography is developed. The software consists of first arrival picking and adjusting module, crosswell traveltime tomography module, and imaging module. This software allows saving the picked first arrival times into the header of seismic data, and using this data directly to the input of crosswell seismic tomography. With an imaging module, velocity structures and ray path can be imaged directly from the output of the tomography module. Because it is developed on the basis of the SU under the Linux and the GUI environment for user, this software can be carried out directly the first arrival picking, inversion and tomogram for crosswell tomography data in the field. Therefore, this software can be improved the applicability of site investigation by tomography method.

Keywords : Crosswell Seismic Tomography, Imaging Module, Velocity Structure, Ray Path

서 론

시추공 탄성파 주시토모그래피는 송신원 배열과 수신원 배열을 시추공상에 배치하여 기록되는 파들의 초기 도달시간(first arrival time)을 구하고 이들로부터 대상 지하단면의 속도구조에 대한 정보를 영상으로 도출하는 기법이다. 이러한 기술은 산업적으로 보편화된 물리탐사 기술의 하나로서 토목/건설사업의 지반조사 분야에 활발히 적용되고 있다. 보다 정확한 토모그램을 작성하기 위해서는 손쉬운 현장자료의 검토 및 초동 발췌, 발췌된 초동오차를 검토 및 보정의 용이성 등이 필수적으로 요구되며 아울러 현장에서도 신속히 개략적인 토모그램을 얻을 수 있도록 하는 시스템이 요망된다.

본 연구에서는 이러한 목적에 맞춰 현장에서도 시추공 탄성파 토모그래피를 얻을 수 있도록 리눅스 환경 하에서 개발하였다. 시추공 토모그래피의 일반적 처리과정이 획득자료의 검토 및 조사영역의 정성적 구조 예측, 초동 발췌 및 발췌오차 검토, 토모그램 작성 및 해석 등으로 Fig. 1과 같이 구성됨을 고려하여 개발된 토모그래피 시스템은 크게 초동의 발췌 및 보정, 초기 모델 생성, 시추공간 주시토모그래피, 그리고 토모그램 모듈로 구성되며, 탄성파 자료처리에 많이 쓰이는 라이브러리(library)인 SU(Seismic Unix; Cohen and Stockwell, 1999)에 기반한 GUI(Graphic User Interface)환경으로 제작되었고, 토모그래피 계산에 필요한 위치정보와 초동 정보를 모두 헤더에 넣어 자료처리의 일관성을 유지하도록 하였다.

소프트웨어의 구성

GUI로 구성된 통합환경에서 사용할 수 있으며, 각각의 모듈은 독립적으로 수행할 수도 있도록 하였다. 통합환경은 eztomo 모듈(module)로 Fig. 2와 같이 나타난다. Pick 메뉴는

*2002년 6월 14일 접수
1) 한성대학교 영상화기술연구실(Imaging Technology Research Laboratory, Hansung University)
2) 한성대학교 정보시스템 공학부(Dept. of Information System Engineering, Hansung University)

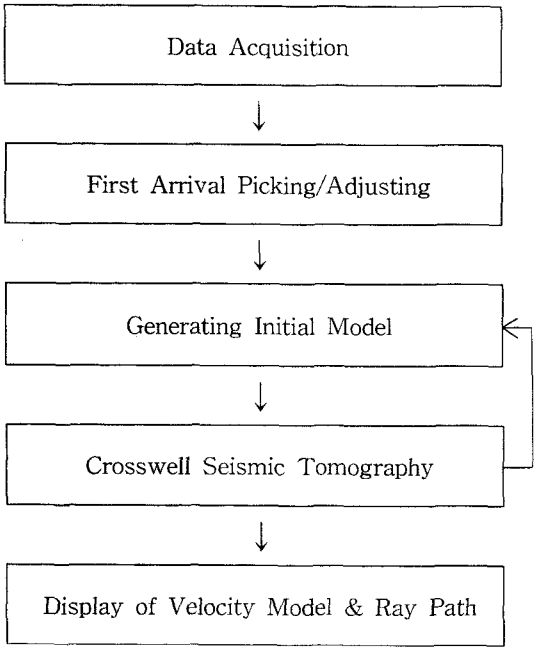

Fig. 1. Flow chart of the conventional crosswell seismic tomography.

Fig. 2. Main window of eztomo.

초동의 발췌 및 보정에 사용되며 탄성파 자료를 읽어서 화면에 디스플레이하는 Open 메뉴와 트레이스 디스플레이 옵션을 선택할 수 있는 Options, 그리고 eztomo 모듈을 종료하는 Quit 메뉴로 구성된다. Model 메뉴는 토모그램을 계산하기 위해 필요한 초기모델을 생성하는 Make, 생성된 모델을 확인/수정할 수 있는 View의 메뉴가 있고, Tomography는 토모그램을 계산하기 위한 메뉴이고 Tomogram은 생성된 토모그램을 분석하는 메뉴이다.

소프트웨어의 설명을 위해 사용한 시추공간 탄성파 측정자료는 (주)지오텍과 영상화기술 연구실 간의 산학협동으로 수행된 자료를 이용하였다(고광범과 이두성, 2002).

탄성파 자료의 초동 발췌 및 보정

획득자료로부터 초동을 발췌하는 과정은 토모그래피 영상단면의 정확도를 결정하는 핵심 부분이다. 초동발췌의 정확도를 높이기 위해서 초동 발췌 및 발췌된 초동의 검토와 반복적인 검증 작업이 필요하다. 이러한 반복적 작업을 효율적으로 수행하기 위해 GUI 환경의 모듈을 개발하였으며, segy포맷의 탄성파자료와의 원활한 연계성을 위해 발췌된 초동을 탄성파자료의 헤더에 저장하도록 함으로써 일관성있게 검증하고 보정할

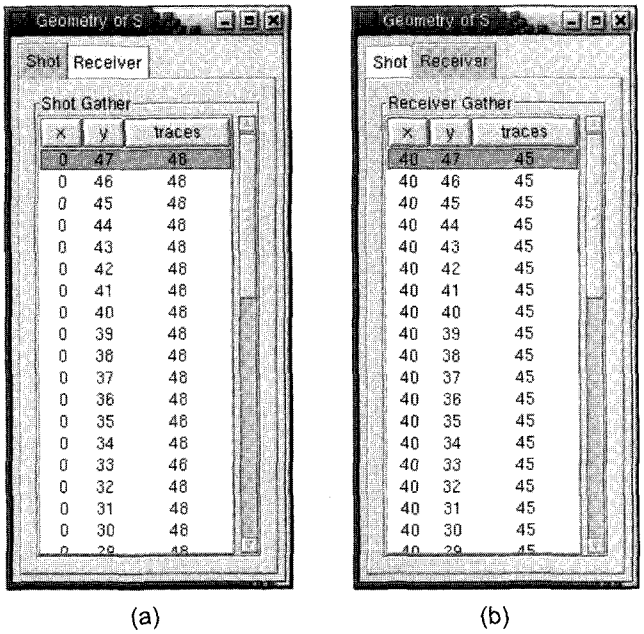

Fig. 3. Geometry information of traces consists of common shot gather (a) and common receiver gather (b).

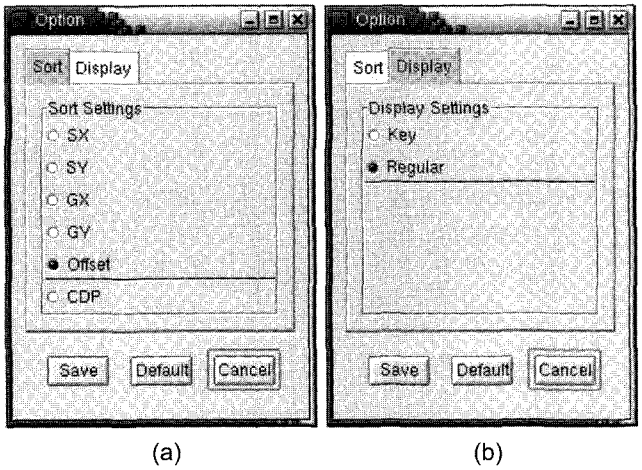

Fig. 4. Option windows with Sort option (a) and Display option (b).

수 있도록 하였다.

공통 수신점 및 공통 발파점 취합자료를 읽어들여 초동발췌를 수행하는 모듈로, Pick 메뉴 하부의 Open 메뉴를 선택하여 탄성파 트레이스를 선택하면 트레이스의 헤더에 저장된 위치정보를 송신기와 수신기로 각각 분류하여 헤더에 입력된 송신기, 수신기의 x, y 방향 좌표와 포함된 트레이스의 수를 디스플레이 한다(Fig. 3). Shot/Receiver에서 원하는 위치를 클릭하면 해당하는 취합자료가 디스플레이 되며, 이 창을 통해 사용자는 공통 수신점 및 공통 발파점 취합자료로 탄성파 자료를 신속하게 확인할 수 있다. 탄성파 자료의 디스플레이 방식은 헤더의 키(key)값에 따라 다양하게 정렬하여 출력할 수 있도록 하였으며 이 기능은 Pick 메뉴의 Options 메뉴로 조정된다. 이

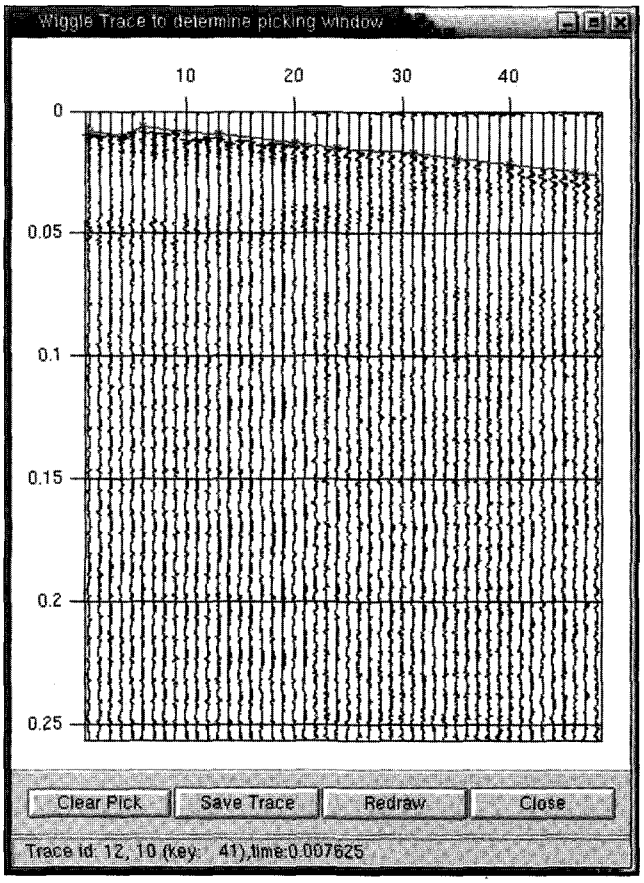

Fig. 5. Picked traces in a picking window.

항목을 클릭하면 Fig. 4와 같은 창이 생성된다.

Sort 메뉴는 정렬할 키값을 의미하며, Display 메뉴는 정렬된 트레이스들 사이의 간격을 일정하게 할 것인지(Regular), 정렬하는 키값에 따라 비례하여 나타낼 것인지(Key)를 결정한다. 예를 들어, Sort와 Display에서 offset/key로 선택하면 offset에 따라 정렬된 트레이스를 offset에 비례한 위치에 디스플레이 하게 된다.

초동은 Fig. 5에서 마우스를 이용해 초동의 위치를 가리킨 상태에서 마우스의 가운데 버튼이나 키보드의 "s" 버튼을 클릭하여 발췌되며, 발췌 취소는 마우스의 오른쪽 버튼이나 "d" 버튼을 클릭하면 된다. 발췌과정의 용이함을 위해 발췌된 초동간 선형내삽/외삽을 수행하도록 하여 사용자가 모든 트레이스에 대해 초동을 발췌할 필요가 없도록 하였다. 보다 정밀한 발췌를 위해 확대/축소를 수행할 수 있으며 이는 마우스의 왼쪽 버튼을 드래그/클릭하면 된다. 발췌를 완료한 후 화면 하단의 "Save Trace" 버튼을 클릭하면 발췌된 초동이 트레이스의 헤더에 저장된다. 저장된 초동값을 수정하기 위해서는 원하는 파일을 불러들인 후, 위와 같은 방법으로 새로운 초동위치를 클릭하고, 발췌의 수정이 완료되면 "Save Trace" 버튼을 눌러 수정된 초동값을 저장하면 된다.

Table 1. Structure of input velocity model for poly2grd module

0.	0.	minimum x, y of model (float)
40.	52.	maximum x, y of model (float)
40	52	number of grid in the direction of x, y (int)
4	1500.0	number of polygon's vertex, velocity (int, float)
0.	0.0	coordinate of first vertex
0.0	23.0	coordinate of second vertex
40.	23.0	···
40.	0.0	coordinate of last vertex (as same as first vertex)
4	2000.0	number of polygon's vertex, velocity (int, float)
0.0	23.0	x, y coordinate of first vertex
0.0	30.0	···
40.0	30.0	···
40.0	23.0	···
4	3000.0	
0.0	30.0	···
0.0	42.0	···
40.0	42.0	···
40.0	30.0	···
4	4000.0	
0.0	42.0	···
0.0	52.0	···
40.0	52.0	···
40.0	42.0	···

초기모델 생성

토모그래피의 결과에 영향을 미치는 요소로는 데이터의 질, 초기모델, 감쇠 상수(damping factor; Van der Sluis and Van der Voust, 1987)와 같은 여러 변수들이 있다. 그 중에서 연구지역에 맞는 초기모델의 설정은 좋은 결과를 위한 중요한 요소가 된다. 일반적인 수평구조 뿐만 아니라, 연구지역 특성에 따라 사용자 임의형태의 속도모델을 만들 수 있도록 하여, 다양한 조건에 맞춰 적용할 수 있도록 하였다.

초기 속도모델 생성을 수행하는 모듈은 poly2grd로서, 대상영역에서 속도가 동일한 지역을 하나의 다각형(Polygon)으로 설정하고, 각 다각형의 속성에 해당 속도값을 할당하여, 다각형의 내부에 포함된 격자가 해당 다각형의 속성값을 가지도록 하였다(Joseph, 1998). 이는 다각형 형태로 저장된 속도구조의 좌표값과 속도를 기록한 파일(Table 1)을 입력자료로 하며, 결과로서 조사대상 영역을 각 속도값이 할당된 격자(grid) 형식의 파일로 출력한다. 예를들어, Table 1과 같은 내용의 polygon_data_file파일이 입력자료일 경우, 다음과 같은 명령문으로 실행하면

poly2grd < polygon_data_file > grid_data_file

Table 2와 같은 형식의 속도모델 파일이 생성되며, 첫째항은 각 격자의 x좌표, 둘째항은 y좌표, 그리고 셋째항은 속도값을 나타낸다.

또한 초기모델을 통합환경(Fig. 2)에서 생성할 수도 있는데 Model/Make 메뉴를 선택하여(Fig. 6) 적절한 초기 입력 변수

Table 2. Output grid format result from poly2grd module

0.0	-0.0	1500.0	left, top velocity of grid (float)
1.0	-0.0	1500.0	···
2.0	-0.0	1500.0	
3.0	-0.0	1500.0	
4.0	-0.0	1500.0	
5.0	-0.0	1500.0	
⋮	⋮	⋮	

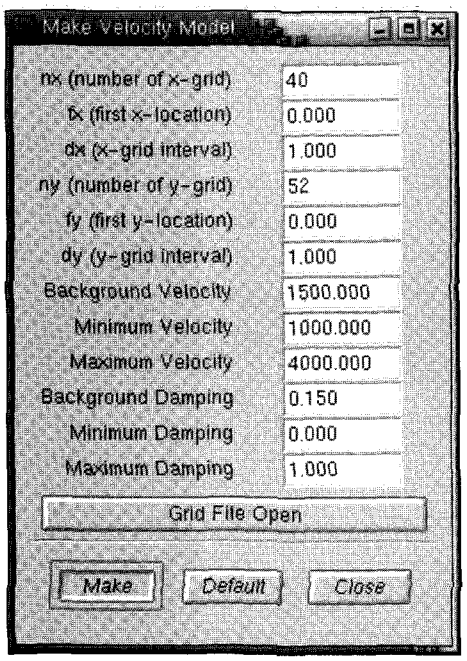

Fig. 6. Parameter window for making initial velocity model.

를 결정한 후 마우스를 이용해 세부적으로 초기모델을 생성할 수 있다(Fig. 7). 화면 오른쪽의 범례에서 적절한 속도위치에서 마우스의 왼쪽버튼을 클릭하면 하단의 "selected velocity"에 나타나는 속도가 변하며 이 상태에서 마우스의 왼쪽 버튼을 클릭 또는 드래그하여 격자를 선택하면 해당하는 격자의 속도가 변하게 된다(Fig. 8). 화면의 "A" 버튼은 새로운 속도와 해당하는 색을 변경할 수 있으며 "M" 버튼은 현재 입력된 속도 또는 색을 변경하는 기능을 가지고 있다(Fig. 9). "V" 버튼은 격자의 속도를 디스플레이하고, "D" 버튼은 감쇠 상수를 디스플레이하고 수정하는 기능을 가지고 있다(Fig. 10). 초기모델의 격자마다 감쇠 상수를 설정할 수 있으므로 주시 토모그래피를 수행하는 과정에서 생기는 속도의 변화량을 제한할 수 있다. "G" 버튼을 통해 모델을 구성하는 격자를 디스플레이할 것인지를 결정할 수 있다(Fig. 8).

기존에 생성된 모델을 수정하기 위해서는 Model/Make 메뉴에서 "Grid File Open" 버튼 또는 Model/View 메뉴를 선택하여 파일을 결정하면 Fig. 7과 같은 창이 생성되며, 이 화면에서 초기모델 생성과 동일한 방법으로 저장되어 있는 모델을 수정할 수 있다. 초기모델 생성 또는 수정이 끝나면 화면하단

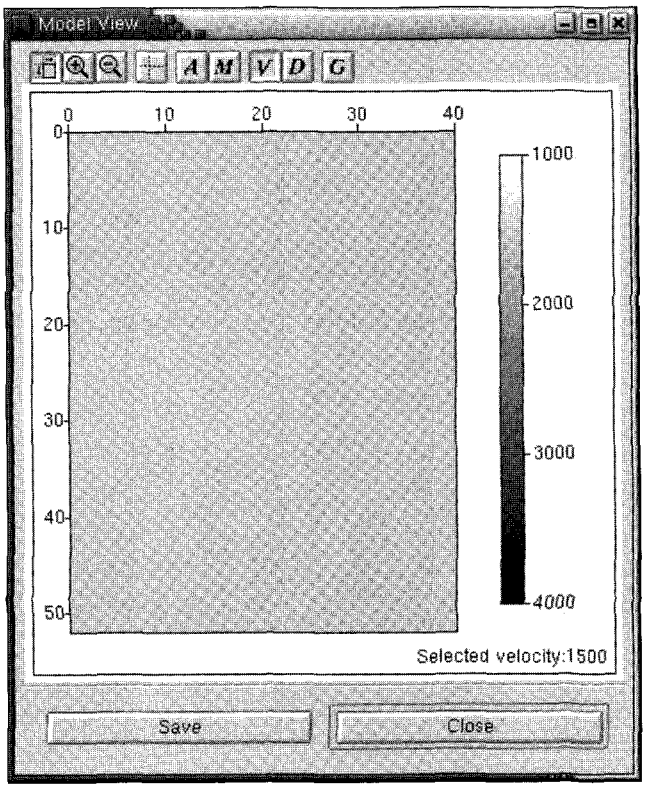

Fig. 7. Model window for initial velocity.

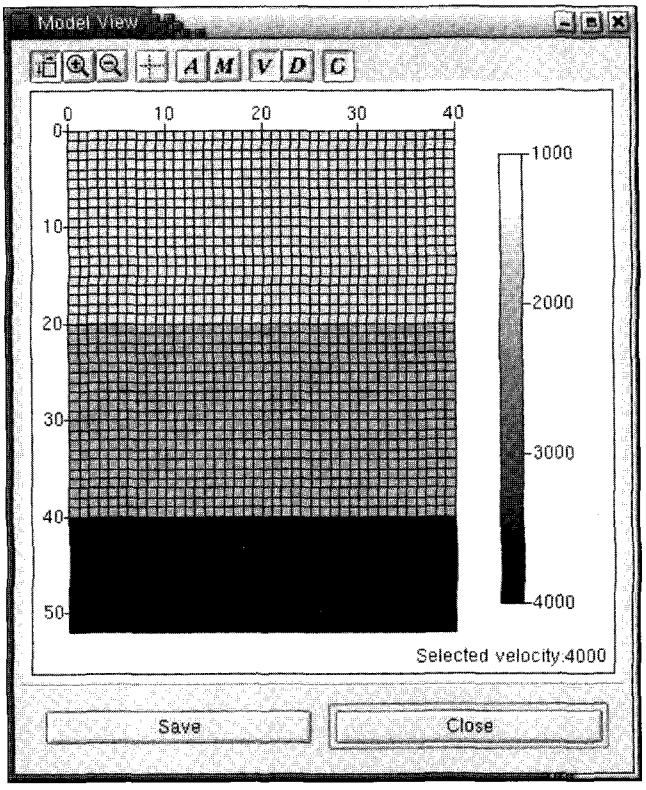

Fig. 8. Modified velocity model by mouse dragging.

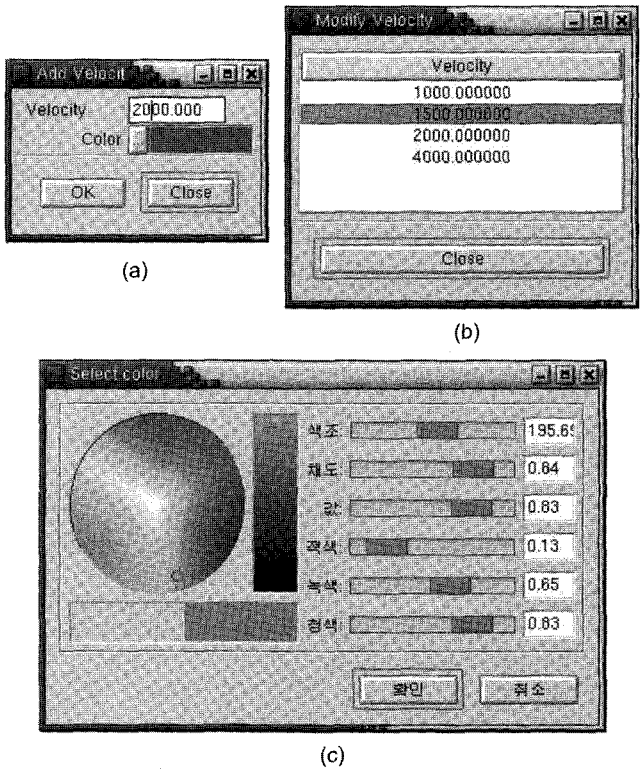

Fig. 9. Dialog windows for modifying velocity range and colors in a model. (a) Add velocity dialog, (b) Modify velocity dialog, (c) Color selection dialog.

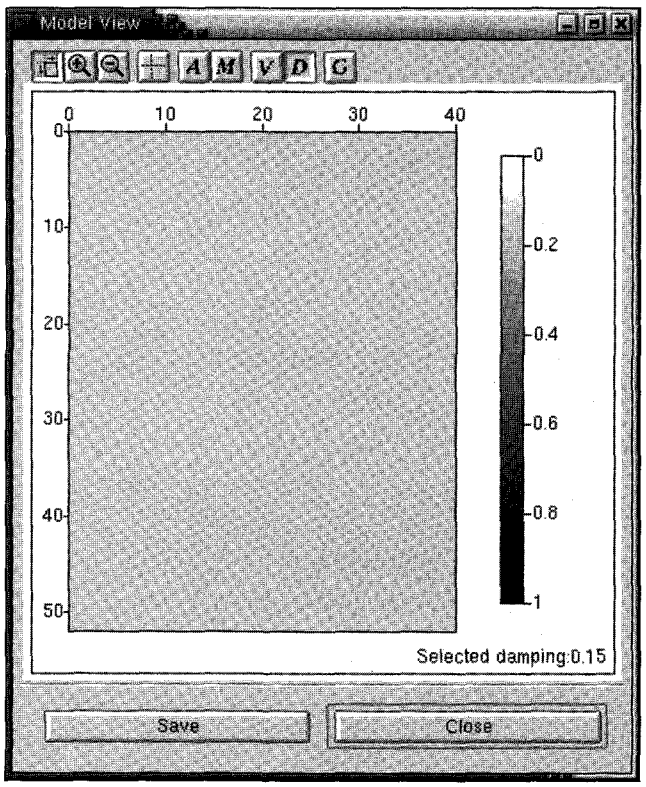

Fig. 10. Model window for damping factor.

Table 3. Parameters for susirt module

1. 1.	dx, dy of model
500. 5000.	minimum, maximum velocity
.15	damping factor
10	maximum iteration number
grid.dat	input model grid file
vel.dat	output resultant vel. model file (grid format)
ray.dat	output resultant ray path file

의 "Save" 버튼을 클릭하여 생성된 모델을 Table 2와 같은 형식의 속도모델 파일로 저장할 수 있다.

주시토모그래피 실행

초기조건으로서 지하구조에 대한 속도분포를 부여하고 선형화 근사에 의한 반복적 방법(임해룡, 1992)을 통해 대상 지역의 속도분포를 구하였다. 이는 파의 초동자료를 바탕으로 초기모형에 대한 파선추적을 실시하여 역속도(slowness) 보정량을 구하고 다시 파선추적을 반복적으로 수행하여 최종 역속도 분포를 구하게 된다.

본 연구에서 사용한 파선추적은 유한차분법에 의한 방법(Vidale, 1988; Schneider, 1992; Qin 1992) 중에서 속도격자 내부에서 파면은 곡면이라고 가정할 경우 속도차가 큰 블록이 인접하여 있을 때 파선추적의 오차가 비교적 적다고 알려진 Schneider의 방법을 채택하였다.

초기 속도모델 파일과 발췌된 초동을 입력자료로 하는 시추공간 주시토모그래피 모듈은 susirt이다. 이 모듈의 입력자료는 헤더에 초동값이 기록된 segy형식 탄성파자료와 초기 속도모델 등 기타 필요한 변수를 기록한 입력변수 파일(Table 3)이다.

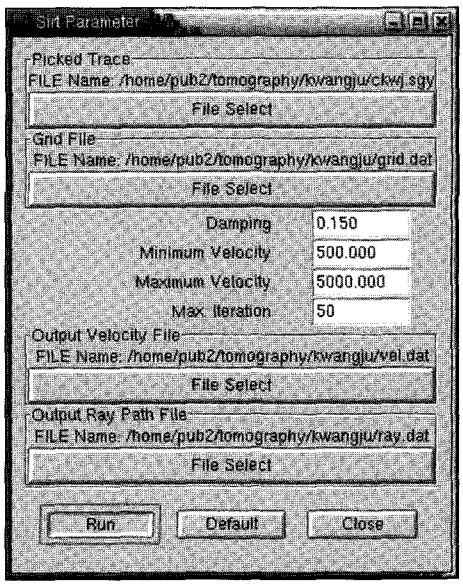

Fig. 11. Parameter input window for running travel time tomography with sirt.

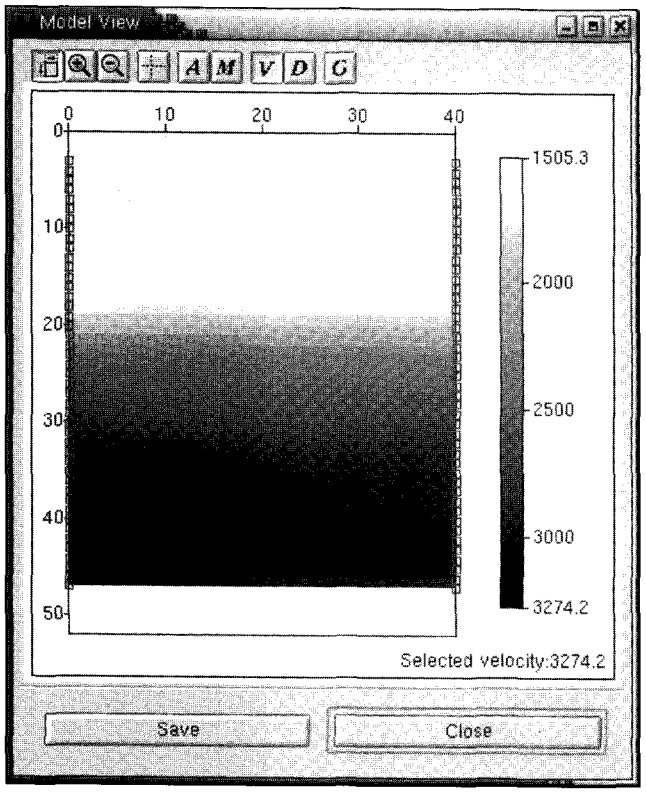

Fig. 12. Tomogram window resulted from travel time tomography with sirt. Rectangles in both sides of model denote shots and receivers.

첫줄은 격자의 x축과 y축 방향의 크기이고, 역산의 발산을 막기위해 둘째줄에 최소, 최대 속도값을 할당한다. 셋째줄은 역산 단계별 속도 값의 증감에 대한 감쇠 상수이고, 넷째줄은 역산의 횟수, 그리고 다섯째줄은 초기 속도모델 파일명이다. 다음과 같이 입력하면 susirt 모듈은 segy형식의 탄성파 트레이스의 헤더에 기록된 초동과 위치정보를 읽어들여 역산을 수행한다.

susirt parfile=parameter_file < picked_trace

계산후에는 Table 3의 설정에 따라 속도모델 결과와 파선경로가 기록된 파일이 각각 vel.dat와 ray.dat라는 이름으로 생성된다.

통합환경에서 주시토모그래피를 실행하기 위해서는 Fig. 2에서 Tomography 메뉴를 선택하면 Fig. 11과 같은 창이 생성되고 해당 파라미터와 입력 파일을 선택하여 "Run" 버튼을 클릭하면 주시토모그래피를 수행하게 된다. 계산이 완료되면 생성된 토모그램이 Fig. 12와 같은 창에 나타난다.

토모그램

주시토모그래피 결과는 대상 영역에 대한 격자 형태의 속도모델과 파선경로가 기록된 아스키 형태의 파일이며, 현장에서 바로 결과를 확인할 수 있는 모듈을 개발하여, 현장에서 취득된 데이터를 신속하게 점검하고, 현장특성과 주시토모그래피 결과를 서로 비교, 보완하여 탐사의 효율성이 극대화되도록 하였다.

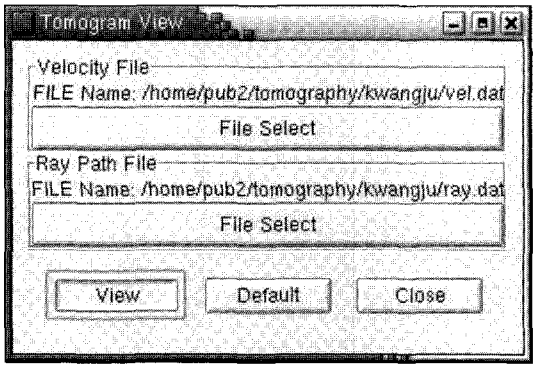

Fig. 13. Parameter window for tomogram display.

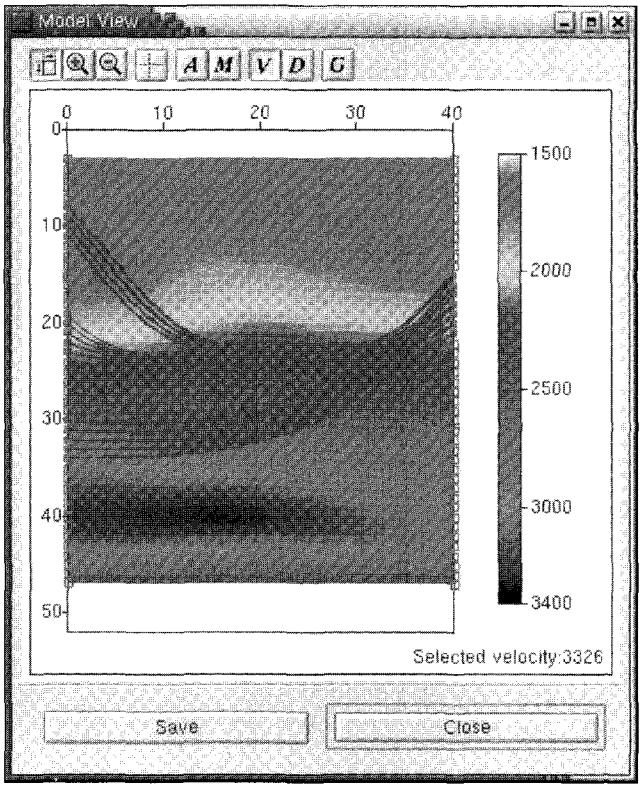

Fig. 14. Tomogram with ray paths which connect selected shots and receivers.

통합환경(Fig. 2)에서 Tomogram 메뉴를 선택하면 Fig. 13과 같은 창이 생성되고, 계산결과로 얻어진 속도구조 정보를 가지고 있는 tomogram과 파선 경로 파일을 선택하여 "View" 버튼을 클릭하면 Fig. 12와 같은 화면이 나타난다. 모델의 좌우측에 나타난 사각형은 파선 경로 파일을 분석하여 얻어진 송신기/수신기를 의미한다. 이때 마우스의 가운데 버튼을 드래그 또는 클릭하여 송신기/수신기를 선택하면 사각형의 내부가 채

워지며, 선택된 송신기로부터 수신기까지 파선경로가 화면에 디스플레이 된다. 시각적 이해를 돕기위해 속도구조를 다양한 색상으로 표현하기 위해서는 초기모델 생성에서 설명한 방법과 동일하게 화면의 "A", "M" 버튼을 이용해 다양한 색으로 속도구조를 디스플레이할 수도 있다(Fig. 14).

결 론

본 연구에서는 손쉽게 사용할 수 있는 시추공간 탄성파 토모그래피 시스템을 리눅스 환경 하에서 개발하였다. 개발된 토모그래피 시스템은 크게 초동의 발췌 및 보정, 초기모델 생성, 시추공간 주시토모그래피, 그리고 토모그램 모듈로 구성된다. SU에 기반한 GUI 환경으로 제작하여 손쉬운 현장자료의 검토 및 초동 발췌, 발췌된 초동오차를 검토 및 보정의 용이성 등의 기능성을 극대화하고, 데이터 정보를 일관되게 관리함으로써 추가적인 자료처리에도 용이할 뿐 아니라, 현장에서도 손쉽게 개략적인 토모그램을 얻을 수 있으므로 그 활용이 기대된다.

사 사

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL) 과제 "탄성파 영상화 기술 연구개발 및 응용"의 일부로서 수행되었다. 이 한국과학기술원(KISTEP)의 재정지원에 감사드린다.

참고문헌

고광범, 이두성, 2002, 최적 토모그램 도출을 위한 시추공간 파선토모그래피 사례연구, 자원공학회지, 한국자원공학회지, 제39권 제4호, in press.

임해룡, 1992, Fermat 원리 및 수정된 파선 경로를 이용한 비선형 파선 토모그래피 연구, 박사학위논문, 서울대학교.

Joseph O'Rourke, 1998, Computational Geometry in C (2nd Edition), Section 7.4 Point in Polygon.

Qin, F., Olsen, K. B., Cai, W., and Schuster, G. T., Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts: *Geophysics*, **57**, 478-487.

Schneider, Jr, W. A., Ranzinger, K. A., Balch, A. H., and Kruse, C., 1992, A dynamic programming approach to first arrival traveltime computation in media with arbitrarily distributed velocities: *Geophysics*, **57**, 39-50.

Van der Sluis, A. and Van der Voust, H. A., 1987, Numerical solution of large, sparse linear algebraic systems arising from tomography problems, in Nolet, G., Ed., Seismic tomography: D. Rield Publ. Co., 49-84.

Vidale, J., 1988, Finite-difference calculation of travel times: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **78**, 2062-2076.