

지질불연속면에 대한 탄성과 굴절법탐사 자료처리 고찰 - GRM, GLI, Tomography

김지수^{1*} · 김수현² · 이준호¹ · 김원기¹ · 이용재¹

¹충북대학교 지구환경과학과 · 기초과학연구소

²벽산 엔지니어링(주) 지반사업부

A Model Study of Processing Methods of Seismic Refraction Data for Mapping Geological Discontinuities - GRM, GLI, Tomography

Ji-Soo Kim^{1*}, Su-Hyun Kim², Jun-Ho Lee¹, Won-Ki Kim¹, and Yong-Jae Lee¹

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences · Institute for Basic Sciences, Chungbuk University

²Byucksan Engineering Co., Ltd · Geotechnical Division

지하 불연속면의 탐지를 위한 굴절법 탄성과 자료에 대하여 3가지의 중요한 자료처리방법을 속도와 심도의 관점에서 비교 관찰하였다. 즉 수치모델링으로 생성된 수평 3층, 경사 3층, 수직단층, 매몰 수직 파쇄대 구조에 대한 발파질 자료들을 일반화된 역행 주시법(GRM), 일반화된 선형 역산법(GLI), 토모그래피를 적용하여 그 자료처리 결과들을 서로 비교 · 분석하였다. 토모그래피는 수직단층, 매몰 파쇄대등의 복잡한 지형기복에서 보다 정확한 지하속도구조를 파악할 수 있는 반면에 일반화된 역행 주시법(GRM)과 일반화된 선형 역산법(GLI)은 수평구조와 경사 경계면 등의 평면 불연속면에 효과적으로 나타나는데 이것은 이들 방법이 주시곡선의 초동 분석위주로 수행되기 때문인 것으로 해석된다.

주요어 : 탄성과 굴절법탐사, 일반화된 역행주시, 일반화된 역산, 토모그래피

Three processing strategies of seismic refraction data are tested in terms of velocity and depth profiles or structures for mapping of geological discontinuities: GRM(generalized reciprocal method), GLI(generalized linear inversion), Tomography. The test data used in this study are the shot gathers reconstructed by numerical modeling for the structures of 3 planar layers(horizontal, inclined), the buried vertical fracture zones, and vertical fault zones. Tomography is shown to be very efficient for mapping of more complicated zone such as vertical fault and buried fracture zones, whereas GRM and GLI can be useful for horizontal and/or inclined layers, probably on their bases of analysis of first arrivals in travel time curves.

Key words : Seismic refraction method, GRM, GLI, Tomography.

서 론

굴절법탐사는 지표부근에서 충격을 주어 탄성파를 발생시켜 속도가 서로 다른 지층 경계면에서 입계 굴절되어 지면에 도달하는 굴절파를 기록 · 분석하여 지하의 속도구조를 알아내는 방법으로서 이것은 지하매질에 대한 속도와 심도 정보를 제공하고 반사법탐사에 비해 탐사작업이 비교적 간편하고 경제적이란 점에서 국내 각

종 토목지질환경 분야에서 전기 비저항탐사와 함께 가장 활발히 적용되고 있다.

지층의 속도가 일정하고 굴절면이 평탄한 경우에는 주시곡선상의 직선의 기울기와 시간절편으로부터 지층의 속도 및 경계면의 심도를 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 일반적으로 지층의 속도가 수평적으로 변하거나 지층경계면이 평탄하지 않고 복잡한 경우에는 지연시간법(Time delay method), 파면법(Wavefront method), 파선

*Corresponding author: geop22@cbnu.ac.kr

추적법(Raytracing method), GRM(Generalized Reciprocal Method) 등이 많이 이용되고 있으며(Reynolds, 1997), 최근 들어서는 지하매질을 여러 개의 셀로 나눈 후 반복적으로 수치모형 반응계산을 수행하여 측정 자료와의 오차가 작은 탄성파속도 구조를 찾는 굴절법 토모그래피법이 많이 시도되고 있다(이두성, 1995; 조창수 외, 2002; 서정희 외, 2002).

자료 수집은 모델링 프로그램을 이용하였고, 수치모형의 자료해석은 GRM, GLI, 굴절법 토모그래피법을 이용하였다. 모델은 수평 3층 구조, 수직 파쇄구조로 설정하였으며 각 모델에 층의 깊이, 층의 속도, 밀도, 지오폰 간격, 지오폰의 수를 정해준 후 정 모델링을 통해 우리가 현장에서 얻을 수 있는 것과 같은 형태의 자료를 얻었다. 이렇게 획득된 자료들은 GRM, GLI, 굴절법 토모그래피 자료처리법을 통해 각층의 깊이, 지하구조 및 탄성파 속도가 결정 되었고, 그 결과를 모델링 과정에서 설정해준 층의 깊이, 속도 및 지하구조와 비교해 보았다. 궁극적으로 이 연구에서는 상대적으로 서로 다른 양상의 결과를 보이는 GRM, GLI, 토모그래피 기법들의 특성을 알아내어 굴절법을 이용한 현장자료 해석에 있어 보다 효과적인 자료처리법을 찾고자 하였다.

배경이론

GRM(Generalized Reciprocal Method)

GRM은 Hagedoorn 플러스-파이너스법을 보다 일반화시킨 굴절법 탄성파탐사 자료해석 방법으로서 기본적인 이론은 주시곡선을 이용한 지층의 속도와 심도를 계산하는 방법과 유사하다(Palmer, 1980; 김지수 외, 2003). 주시 곡선으로부터 첫 번째 지층의 속도를 결정한 후 두 수진기사이의 거리 XY의 변화에 따른 속도분석 함수(Velocity analysis function) t_v 와 시간-깊이 함수(Time depth function) t_G 를 이용하여 최적 XY값을 결정하고 각 층의 속도를 구한다.

$$\text{속도분석 함수: } t_v = \frac{1}{2}(t_{AY} - t_{BX} + t_{AB}) \quad (1)$$

$$\text{시간-깊이 함수: } t_G = \frac{1}{2} \left[t_{AY} + t_{BX} - \left(t_{AB} + \frac{XY}{V_n} \right) \right] \quad (2)$$

각 층이 평탄하고 일정한 속도를 갖는다고 가정했을 때 주 굴절층의 속도는 주행시간과 거리를 도시함으로써 추정할 수 있다. 그러나 실재는 이러한 가정에 맞지 않고 주 굴절층 상부의 각 층에 대한 속도를 알 수 없

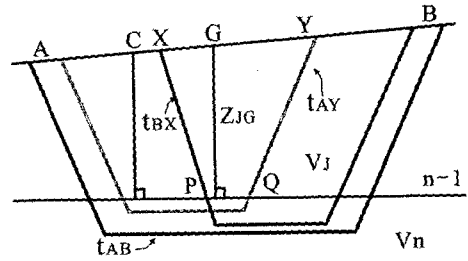


Fig. 1. Schematic summary of parameters used in the GRM.

기 때문에 속도분석함수를 이용하여 주 굴절층의 속도를 계산할 수 있다. 속도분석함수에서 두 점 XY의 거리가 변화함에 따라 P와 Q점이 이동하게 되고, 이 두 점이 일치할 때 t_v 값은 하부의 속도를 정확히 대변할 수 있다. 따라서 이때의 XY의 거리를 '적정 XY'값이라고 하고 그 값에 대한 속도분석 함수의 기울기가 굴절층 속도의 역수가 된다.

굴절층의 속도를 결정한 다음에 이 굴절 층의 심도를 결정하기 위해서 시간함수를 계산해야 한다. 시간-심도 함수에서 t_G 는 XY의 중심점 G에서의 심도에 대한 시간이 되고, 겹보기 속도 V_n 는 속도분석 함수에서와 마찬가지로 적정 XY값일 때 가장 적절한 굴절층의 심도를 나타내 주는 시간-깊이 함수 값을 얻게 된다. 시간-깊이 함수를 실제 깊이로 전환하기 위해서는 깊이 전환요소를 알아야 한다. 여기서 시간을 깊이로 바꾸어주는 요소는

$$V_{jn} = \frac{2V_j}{\cos\alpha_{jn} + \cos\beta_{jn}} \quad (3)$$

이 된다. 일반적으로 α_{jn} 과 β_{jn} 은 지층의 경사에 의한 것으로서 알 수 없고 V_{jn} 또한 정확히 계산할 수 없는 값이므로, 이러한 지층의 경사에 대한 영향을 무시한다면 위의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{jn} \approx \frac{V_n V_j}{[V_n^2 - V_j^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

GRM은 굴절면이 불규칙하거나, 속도 역전층이나 암영대가 존재하는 경우에도 굴절면의 깊이를 비교적 정확하게 계산할 수 있다. 이 방법을 사용하기 위해서는 수진기 간격을 일정하게 유지시켜야 하고 양단반파에 의한 역행주시를 정확하게 측정하여야 한다.

GLI (Generalized Linear Inversion)

GLI는 현장에서 얻은 자료를 통해 주시곡선을 작성하

고 이론값을 통한 주시곡선과 얼마나 유사한 경향을 보이는지를 가지고 현장의 지하구조를 해석하는 방법이다. 즉, 실제의 지하구조는 이론으로 만들어진 지하구조의 모델에서 오차범위를 줄이는 작업을 반복해 해석한다.

$$F(M) = F(M_0) + \frac{\partial F(M_0)}{\partial M} \Delta M \quad (5)$$

식 (5)에서 $F(M)$ 은 측정된 값에서의 초동시간을 나타내며 $F(M_0)$ 은 초기지하구조 모델에서의 초동시간을 나타낸다. $\partial F(M_0)/\partial M$ 은 계산된 값의 오차범위를 나타내는 것으로 이것을 최소화시킴에 따라 지하구조가 실제 지하구조에 접근한다(Chun and Jacewitz, 1981). 초동 추정시간은 파선 추적법으로 계산할 수 있으며, 이것들은 Fig. 2의 “model breaks”로 표시된다. 측정된 초동과 모델로부터 얻은 초동 사이에는 오차가 나타나며, 이 오차를 최소화시키는 과정에서 지하 구조가 해석된다.

토모그래피(Tomography)

토모그래피법은 지하 구조의 물성 중에서 속도를 구하는 방법으로 속도와 파선의 길이, 파의 도달시간을 이용하여 지배 방정식을 구성하게 된다. Fig. 3에서 송신 원으로부터 수신점에 도달한 시간을 파선의 길이와 역 속도에 대한 지배방정식으로 표현하면

$$t_i = \int ds l(s) \quad (6)$$

이며 이들을 모델 인자의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$t_i = \sum_{j=1}^M l_{ij} s_j \quad (7)$$

여기서 t_i 는 i 번째 파선의 주시, s_j 는 j 번째 격자의 역 속도, l_{ij} 는 i 번째 파선이 j 번째 격자를 지나는 파선의 길이, M 은 격자의 총 개수를 뜻한다. l_{ij} 는 s_j 의 함수이며 이를 행렬로 표현하면 다음과 같다(Dines and Lytle,

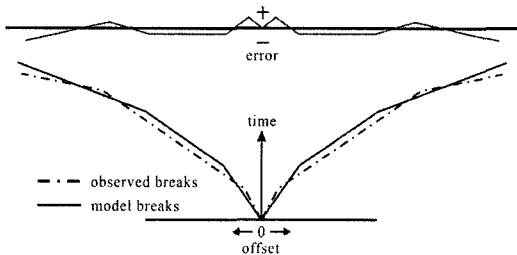


Fig. 2. Time error between observed and model breaks in GLI.

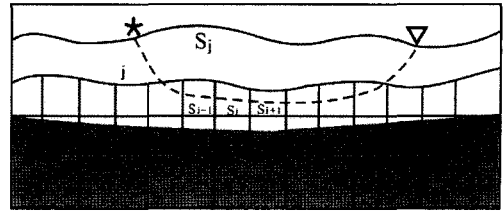


Fig. 3. Schematic model for refraction tomography.

1979; Berryman, 1989).

$$t = Ls \quad (8)$$

굴절법 토모그래피에서 파선은 속도에 대한 함수이므로 비선형 주시 토모그래피가 요구된다. 비선형 주시 토모그래피 역산은 주어진 속도구조에서 반복적으로 송신 원과 수신점 사이의 도달시간과 파선경로가 요구된다. 도달시간 계산을 위하여 역 속도는 균일한 격자를 가진 역속도 구조로 변환하기 위하여 1차 선형 내삽을 수행하였으며 역산은 반복적 선형 역투영법인 SIRT법(조창수 외, 2002)을 적용하였다.

수치모델 자료처리

수평 3층 구조

1층, 2층, 3층의 속도는 각각 800, 2000, 3500 m/s로 설정하였으며, 각 경계면은 4m, 6m의 깊이로 설정하였다(Fig. 4). 이론모형에 대한 수신기는 모두 24개로 0m에서 46m까지 2m 간격으로 설정하였다. 발파점은 원거리 발파점까지 모두 9개로서 원거리 송신원은 양단의 수신점으로부터 8m, 5m 떨어진 곳에 위치하고 축선 내부의 송신원은 5m 간격으로 5개를 설정하였다.

수평 3층 구조 모형에 대해 GRM, GLI를 통한 자료처리 결과는 각각 Fig. 5, Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 심도와 속도가 전반적으로 본래의 모형을 잘 따라가고 있는 것을 확인할 수 있다.

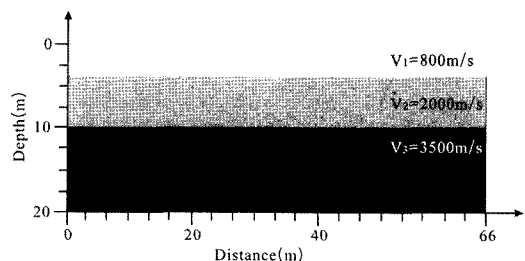


Fig. 4. Three horizontal-layer model.

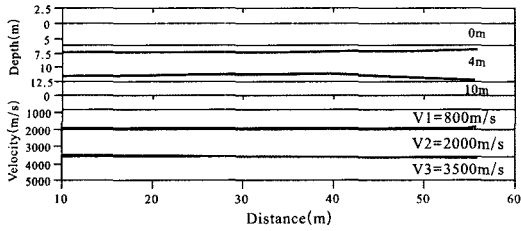


Fig. 5. Velocity and depth profiles from GRM.

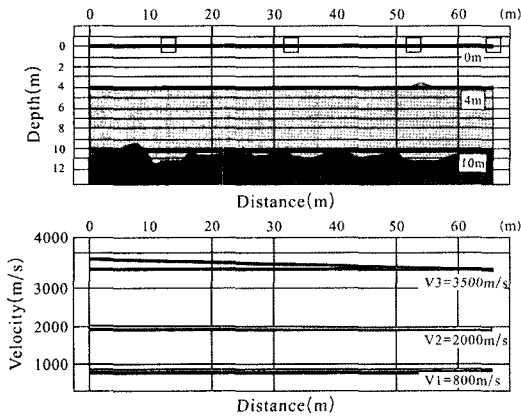


Fig. 6. Velocity and depth profiles from GLI.

굴절법 토모그래피법을 사용한 자료처리 결과(Fig. 7)는 GRM, GLI를 사용한 자료처리 결과보다 비교적 오

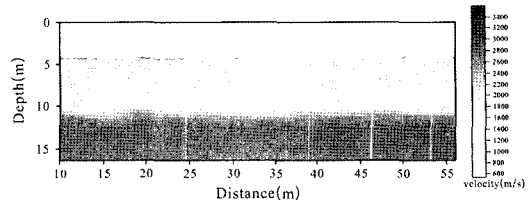


Fig. 7. Velocity structure from tomography.

차가 크게 나왔는데(Table 1), 이것은 수평적으로 속도변화가 거의 없는 지하구조에서는 초동 선으로서 층의 경계를 찾아가는 GRM, GLI를 통한 자료처리 결과가 층의 경계부의 셀의 평균값을 기반으로 하는 굴절법 토모그래피보다 보다 나은 결과를 초래한다는 것을 보여준다.

경사진 3층 구조

경사진 3층 구조(Fig. 8a)에 경사정보는 정 방향과 역 방향에 대한 주시곡선의 비대칭으로 잘 나타나고 있다(Fig. 8b). 처리 결과에서도 초동분석에 기인하는 GRM을 사용한 자료처리 결과(Fig. 9)가 토모그래피(Fig. 10)보다 안정적으로 나와 단순한 선의 경계면을 찾는데 GRM이 보다 효과적이라는 점을 보여준다.

수직 파쇄구조

수직파쇄구조는 상부 층과 하부 층의 속도는 각각 800 m/s, 2000 m/s, 저속도대의 속도는 1000 m/s, 상부

Table 1. Velocities and depths estimated for 3 horizontal layer model.

3 Horizontal Layers	GRM			GLI			Tomography		
	Layer	1	2	3	1	2	3	1	2
V (true)	800 m/s	2000 m/s	3500 m/s	800 m/s	2000 m/s	3500m/s	800 m/s	2000 m/s	3500 m/s
V (estimated)	800 m/s	2000 m/s	3600 m/s	800 m/s	2000 m/s	3650 m/s	850 m/s	1850 m/s	3200 m/s
Depth (true)	4 m	10 m		4 m	10 m		4 m	10 m	
Depth (estimated)	4.13 m	9.5 m		3.9 m	10.4 m		4.3 m	9.35 m	

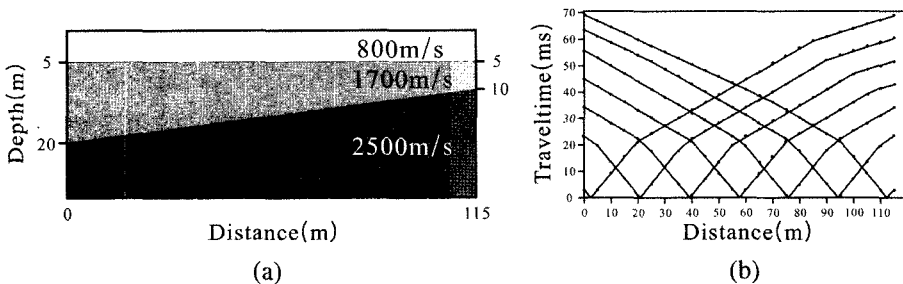


Fig. 8. (a)Three inclined-layer model (b) Traveltime curve.

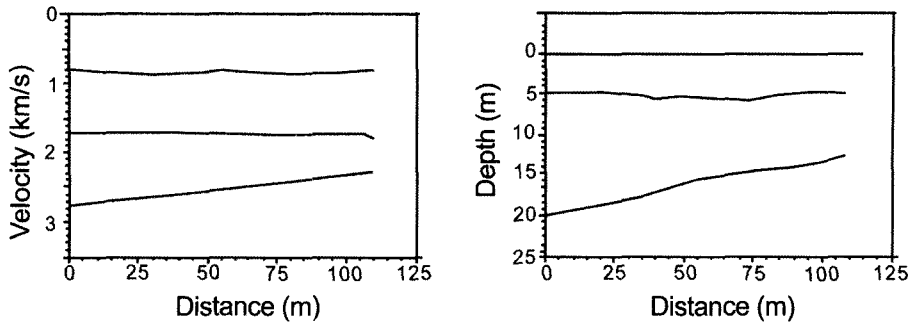


Fig. 9. Velocity and depth profiles from GRM.

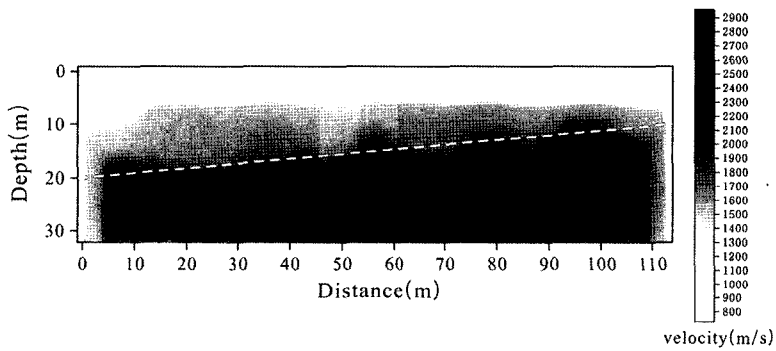


Fig. 10. Velocity structure from tomography.

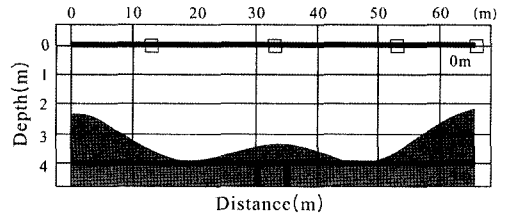
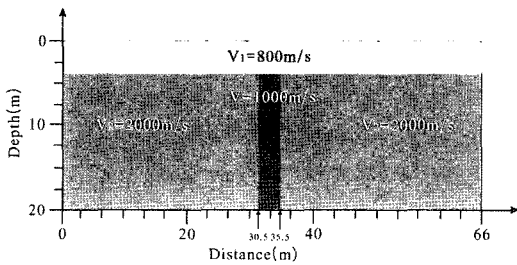


Fig. 11. Buried vertical fracture model.

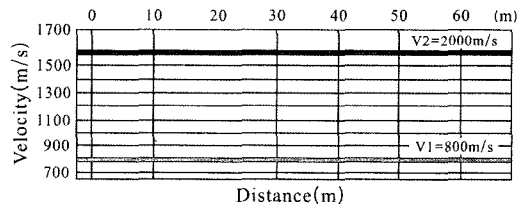


Fig. 13. Velocity and depth profiles from GLI.

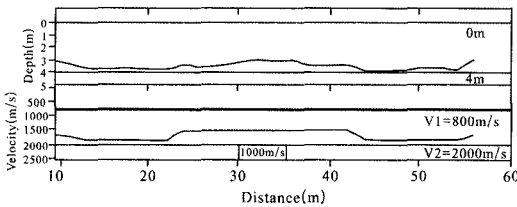


Fig. 12. Velocity and depth profiles from GRM.

층의 심도는 4 m로 설정하였다(Fig. 11). GRM, GLI를 사용한 자료처리 결과에서(Fig. 12, Fig. 13) 수직 파쇄

대의 위치는 어느 정도 해석되지만 그 파쇄대의 폭은 정확히 결정하기 어렵다. 한편 굴절법 토모그래피법을 사용한 자료처리 결과(Fig. 14)는 GRM, GLI를 사용한 자료처리 결과보다 단층 파쇄대의 위치를 비교적 정확히 찾아냈을 뿐 아니라, 파쇄대의 좁은 폭 또한 보다 정확히 해석된다.

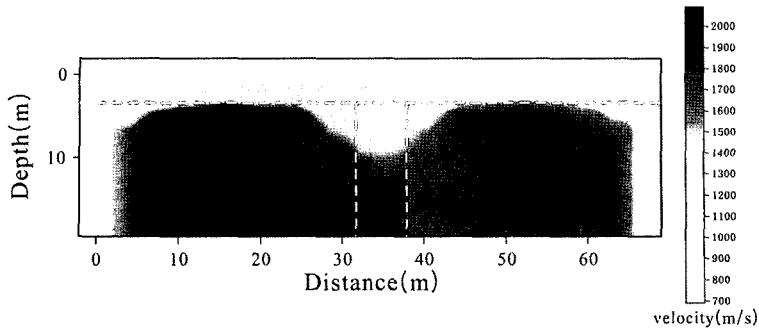


Fig. 14. Velocity structure from tomography.

Table 2. Velocities and depths estimated for the buried vertical fracture model.

3 Horizontal Layers	GRM		GLI		Tomography	
Layer	1	2	1	2	1	2
V (true)	800 m/s	2000 m/s	800 m/s	2000 m/s	800 m/s	2000 m/s
V (estimated)	800 m/s	1725 m/s	800 m/s	1625 m/s	860 m/s	1870 m/s
Depth (true)	4 m		4 m		4 m	
Depth (estimated)	3.4 m		4.8 m		4.3 m	

수직 단층 구조

지질공학적인 측면에서 자주 접하는 수직단층구조에 대한 처리결과를 살펴보았다. 단층구조(Fig. 15a)에 대한 주시곡선(Fig. 15b)에서 보듯이 수직 낙폭에 대한 정보는 주시곡선 상에서 상부 수평면과 하부 수평면의 시간

절편 t_{i1} 과 t_{i2} 로 유추할 수 있다. 수직단층에 대한 자료 처리 결과 GRM은 단층의 상부 위치는 어느 정도 확인 해주지만 그 연장성과 속도 등은 토모그래피보다 안정적이지 못한 것으로 확인되었다(Fig. 16, Fig. 17).

Fig. 15a의 수직 낙폭은 주시곡선 상에서 다음과 같이

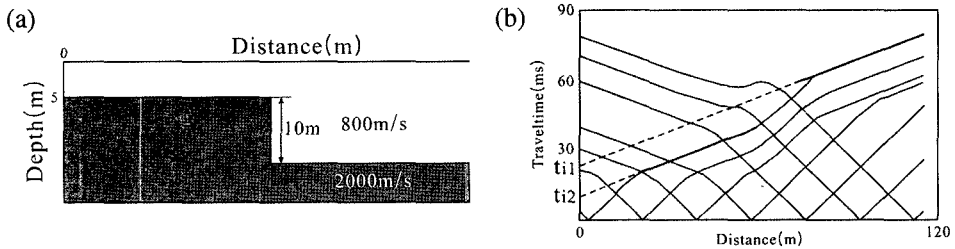


Fig. 15. (a) Vertical fault model (b) Tomography.

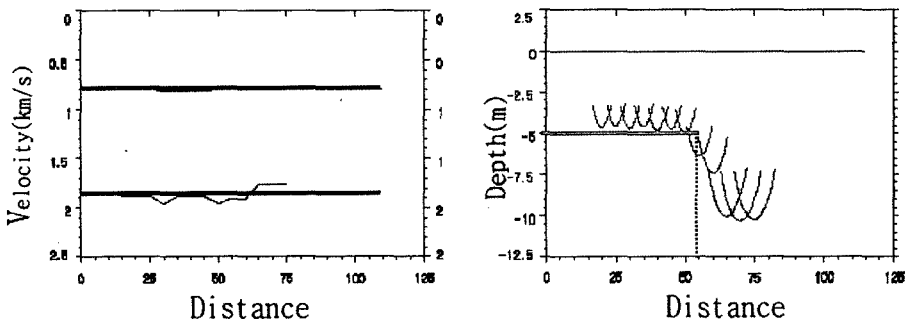


Fig. 16. Velocity and depth profiles from GRM.

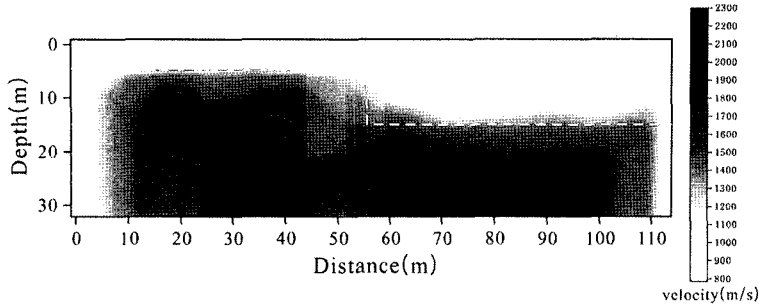


Fig. 17. Velocity structure from tomography.

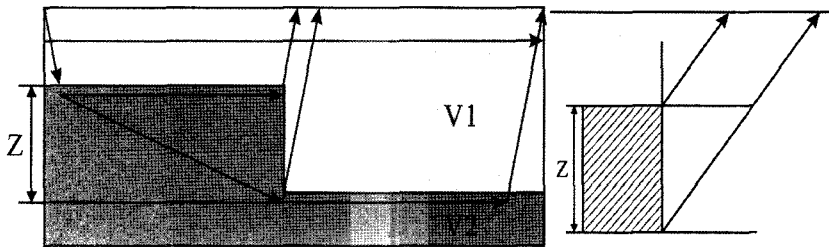


Fig. 18. Schematic diagram for calculation of drop Z of vertical fault.

구해진다(Fig. 18; 손호웅 외, 1999).

$$Z = \frac{(t_{i2} - t_{i1}) V_2 V_1}{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}} \quad (9)$$

여기서 t_{i1} 과 t_{i2} 는 각각 주시곡선(Fig. 15b)의 상부 수평면, 하부 수평면의 시간절편으로서 각각 0.012 s, 0.0235 s를 보인다. $V_1=800$ m/s, $V_2=2000$ m/s를 대입하여 구한 결과 수직 낙폭은 9 m로서 실제 낙폭(10 m)에 접근한다.

현장자료

수직 단층 또는 수직파쇄대 구조로 해석된 지역에서 굴절법탐사를 수행하여 3가지 자료처리기법을 적용해 보았다. 수신기는 수치모형에서와 동일하게 0 m에서 46 m 까지 2 m간격으로 24개 설치하였고, 발파점 또한 수치모형에서와 동일하게 같은 배열을 사용하여 원거리 발파점까지 모두 9개의 송신원을 설치하였다. GRM을 사용한 자료처리 결과(Fig. 18a)심도는 대략 2~6 m로 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 알아지는 양상을 보였고, 속도는 1층의 속도는 350 m/s, 2층의 속도는 700 m/s 정도로 나타났다. GLI를 사용한 자료처리 결과(Fig. 19b) 또한 GRM을 통해 얻은 자료처리 결과와 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

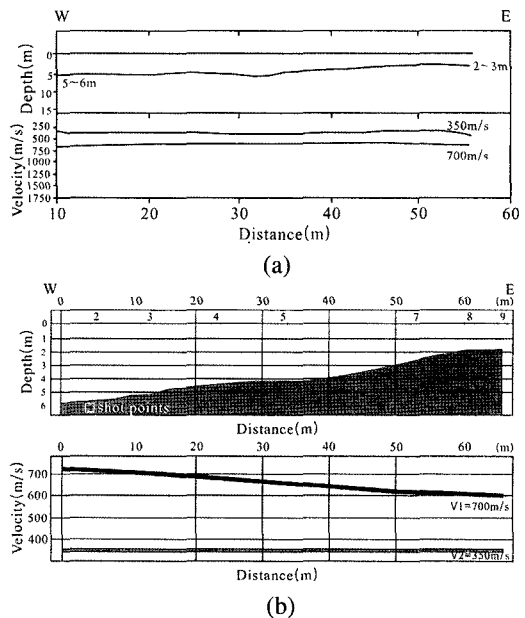


Fig. 19. (a) Velocity and depth profiles from GRM (b) Velocity and depth profiles from GLI.

토모그래피를 이용한 자료처리 결과(Fig. 20)는 1층의 심도와 속도는 GRM, GLI를 사용한 자료처리 결과와 거의 일치하지만 수평적인 속도변화와 복잡한 구조를 갖

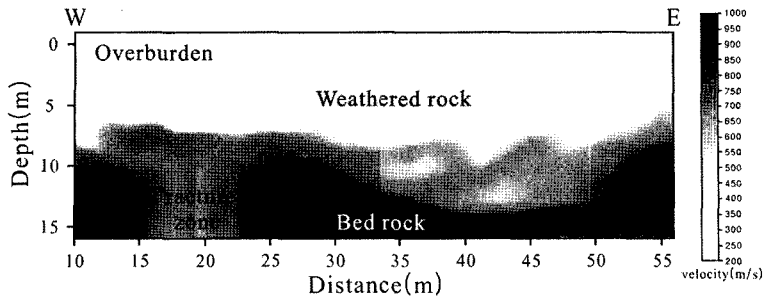


Fig. 20. Velocity structure from tomography.

는 수직 파쇄대의 영상이 뚜렷이 나타나고 있다.

결론

이 연구에서는 굴절법탐사 자료처리법인 일반화된 역행 주시법(GRM), 일반화된 선형 역산법(GLI), 굴절법 토모그래피를 수치모형자료 및 현장자료에 적용하여 각각의 탄성과굴절법 자료처리의 각 처리기법 특성을 비교·분석 하였다. 또한 수직 파쇄대로 해석된 지역에서 자료를 수집하여 현장에서의 적용성을 살펴보았다. 수치모형자료에 대한 자료처리 결과 수평 또는 경사진 3층 구조의 경우와 같이 평면구조에서는 GRM과 GLI기법이 토모그래피기법에 비해 오차가 비교적 적게 나타났지만, 기반암 내에 수직 파쇄대, 수직단층대가 존재하는 경우에는 토모그래피 기법이 효과적이었다.

수직 파쇄대 지역에서 얻은 현장자료를 처리한 결과 GRM과 GLI는 풍화대와 상부 풍화암의 경계를 찾는 데 효과적이었으나 파쇄대처럼 수평적 속도변화가 심하고 복잡한 구조를 가지는 상부와 하부 풍화암의 경계는 토모그래피에서 효과적으로 해석할 수 있었다.

사사

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힌다.

참고문헌

- 김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수, 2003, 물리탐사의 활용, 시그마 프레스, 791p.
 서정희 외, 2002, 토목·환경 분야 적용을 위한 물리탐사 실무 지침, 한국지구물리탐사학회.
 손호용, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영,

조인기, 김학수, 1999, 지반환경 물리탐사, 시그마 프레스, 751p.

이두성, 1995, 유한 차분법에 기초한 파선 경로 계산 알고리즘, 한국 자원 공학회, 31, 150-155.

조창수, 이희일, 서정희, 2002, 탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도분포 해석, 물리탐사, 5, No.1, 6-12.

Berryman, J. G., 1989, Fermat's principle and nonlinear travel time tomography, Physical Rev. Lett., 62, 2953-2956.

Chun, J. H. and Jacewitz, C. A., 1981, The first arrival time surface and estimation of statics: 51st Annual International Meeting. Society of Exploration Geophysicists, Los Angeles.

Dines K. A., and Lytle R. J., 1979, Computerized geophysical tomography, Proc. IEEE., 67, 1065-1073.

Palmer, D., 1980, The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation, Tulsa, Society of Exploration Geophysicist.

Reynolds, J. M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons, 796p.

2006년 10월 23일 원고접수, 2006년 11월 26일 게재승인

김지수

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-276-9645
E-mail: geop22@cbnu.ac.kr

김수현

백산 엔지니어링(주)
150-890, 서울특별시 영등포구 여의도동 44-5
Tel: 02-767-5532
Fax: 02-783-8941
E-mail: kimsh@bseng.co.kr

이준호

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-276-9645
E-mail: jhlee31@nate.com

김원기

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-276-9645
E-mail: konekee@naver.com

이용재

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-276-9645
E-mail: akaby@cbnu.ac.kr