

지반침하지역에서의 탄성과 굴절법 탐사 적용사례 Case Study on the Seismic Refraction Survey in a Subsidence Area

윤상호¹⁾, Sang-Ho Yun, 지 준²⁾, Jun Ji, 이두성³⁾, Doo-Sung Lee

¹⁾ 한성대학교 영상화기술 연구실 연구원, Researcher, Imaging Technology Research Lab., Hansung Univ.

²⁾ 한성대학교 정보시스템공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Information System Engineering, Hansung Univ.

³⁾ 한성대학교 정보시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Information System Engineering, Hansung Univ.

SYNOPSIS : Seismic refraction survey was performed for 10 lines along NE-SW and NW-SE directions above Nampoong gallery at Makyo-ri, Dogye, Samcheok, Kangwon-do. 48 geophones were laid in line with the interval of 1m, and a 5Kg hammer was used as a source at 5 points for each line. Data processing was done using reciprocal time method, GRM, and travelttime tomography which utilizes wavefront expansion method for forward process and SIRT for inversion. The result shows that the first layer has its lower boundary between 3.49m and 8.88m. The P-wave velocity of the first and the second layer were estimated as 270 360m/s and 1550 1940m/s respectively. When the boundary of the first and second layer is smooth enough and the velocity difference is large enough, GRM has little advantage over reciprocal time method. The result of reciprocal method and travelttime tomography shows consistency. The northeast part of the boundary has syncline structure, which is similar to the topography above. This implies that the collapse of the cavities of Nampoong gallery result in the subsidence of the ground surface. The subsidence is in progress across the Youngdong railroad, therefore a proper reinforcement work is required.

Key words : Subsidence, Reciprocal time method, GRM, Travelttime tomography

1. 서 론

한반도 내에 존재하는 석탄은 대부분 고생대 말에서 중생대 초에 생성되었으나 중생대 이후 두꺼운 퇴적층으로 피복 되었으며 중생대 말의 지각변동으로 인해 교란되었다. 따라서 국내의 채탄작업은 지층의 경사에 따라 심부로 진행되었으며 주된 채탄방법은 탄층의 경사를 이용한 위경사승 봉락식 채탄법으로서 화약발파를 시행하면서 경사를 따라 운반갱으로 집적시키는 방법이 많이 활용되었다. 이렇게 생성된 채굴적은 결국은 붕괴되고 이완된 지반은 암반의 균열을 초래하며 그 영향이 상부지표까지 전달될 경우 지반침하로 나타나게 된다. 연구지역인 강원도 삼척시 도계읍 남풍갱 상부지표는 이러한 지반침하를 겪고 있는 것으로 확인되고 있다. 이 지역의 시추조사 결과 갱도의 존재가 확인되었고 채굴심도는 25~65m 정도로 나타나고 있으며 지하 60m까지도 RQD가 25미만으로서 암반의 균열이 매우 심한 상태이다. (석탄산업 합리화 사업단, 1996)

본 연구는 위 지역에서 실시된 3D 탄성과 반사법 탐사 중 정보정을 수행하기 위해 실시된 굴절법 탐

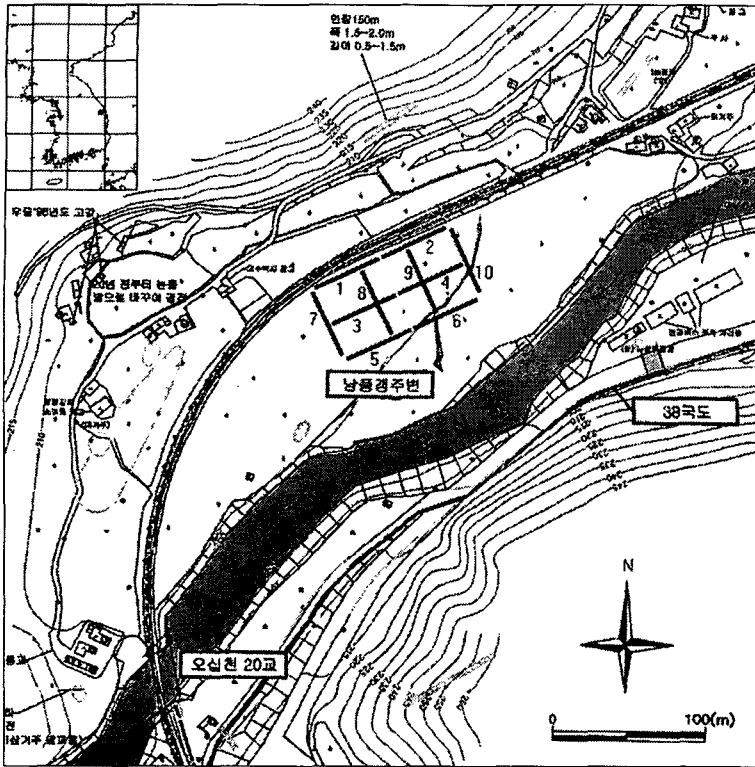


Fig. 1. Location map of the Dogye seismic refraction area

를 역행주시법의 결과와 비교 검토하였다. 그 결과 GRM사용의 이점이 작다고 판단되어 상대적으로 간단한 방법인 역행주시법의 결과만을 고려하였다. 비선형 주시 토모그래피는 초동계산을 위한 파선추적으로는 파면확장법(wavefront expansion method; Qin et al, 1992)을, 역산을 위한 행렬 연산에는 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstructive Technique; Dines Lytle, 1979)를 사용하였다.

2. 탄성과 자료획득

연구지역은 영동선 철도를 한 번으로 북동-남서 방향으로 94m, 북서-남동 방향으로 55m에 걸친 장방형의 지역이다. 이 지역에 Fig. 1과 같이 10개의 측선을 통하여 자료를 획득하였다. 각 측선에서는 48개의 40Hz지오폰을 1m간격으로 일렬로 설치하였으며 5Kg 해머를 파원으로 5개의 장소에 타격을 가하였다. 타격위치는 1번과 48번 지오폰에서 15m 원거리발파(phantom shooting), 1번과 48번 지오폰 위치, 그리고 24번과 25번 지오폰의 중앙으로 하였다. 자료기록은 0.5msec의 샘플링 간격으로 0.5초간 실시하였다.

3. 자료처리 방법

3.1 속도 분석

현장에서 획득된 자료는 SEG2 형식으로서 이를 SU포맷으로 변환하여 기초적인 자료처리는 SU를 사용하여 수행하였다. 얻어진 자료의 초동기록은 직접파와 제 1차 굴절파의 구분을 보였다. 대부분의 측선에서 제 2차 굴절파는 뚜렷하게 보이지 않았으며 이는 퇴적층 하부로 바로 파쇄연암이 깊은 심도까지 존재하는 시추결과를 반영하는 것으로 보인다.

사에 관한 것이다. 지반침하의 구체적인 양상은 지하 심부에 대한 반사법 탐사를 통해서 밝혀지겠지만 상부의 매립 및 퇴적층에 의한 효과를 제거하기 위해서는 굴절법을 이용한 정보정의 실시가 요구되는 관계로 동일한 지역에서의 굴절법 탐사를 별도로 실시하였다. 따라서 이번 굴절법 탐사의 목적은 첫 번째 굴절면의 굴곡을 밝혀내는데 있다. 굴절법 탐사는 2D로 시행되었으며 각 측선에서 얻어진 결과를 취합하여 거리 역비례 내삽법(inverse distance interpolation)을 이용해 반사법 탐사 지역 전체에 대한 제 1 굴절면의 심도분포를 얻어내었다.

굴절법 탐사의 자료처리는 역행주시법(reciprocal time method; Hawkins, 1961)과 이를 일반화시킨 GRM(Generalized Reciprocal Method; Palmer, 1981), 그리고 비선형 주시 토모그래피를 이용하였다. GRM의 경우 굴곡이 가장 심한 지역을 선택해서 그 결과

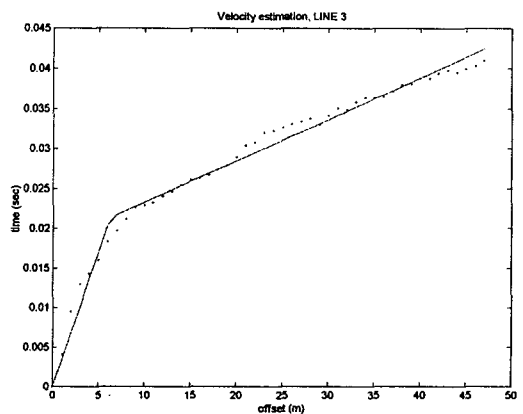


Fig. 2. First arrival fitting

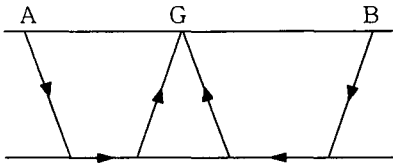


Fig. 3. Reciprocal time method

다. 이로부터 초동기록을 picking하여 속도분석을 수행한 결과 상부층의 p파 속도는 270 ~ 360m/s로 나타났다. 속도분석은 오차를 최소한으로 줄이고 모든 측선에서 동일한 객관성을 유지하기 위해 직접파의 속도와 굴절파의 속도, 그리고 crossover distance 이 3개의 값을 모델변수로 하여 초기예상 crossover distance를 입력하면 이로부터 초기 직접파와 굴절파의 속도를 계산하여 넣고 그 모델에서 얻어진 초동시간과 실측시간의 차이로부터 모델을 갱신시키는 것을 수회 반복하는 주시역산을 수행하였으며 (Fig. 2) 그 결과는 Table. 1에 정리하였다. 측선에 따라 속도가 다르게 나타나고 있기 때문에 전체평균을 사용하지 않고 각 측선에서 측정한 양방향의 속도의 평균을 취해 측선별로 심도계산을 수행하였다. 각 연구지역은 북동쪽으로 약 3 이하의 완만한 경사를 보이지만 전체에 걸쳐 고도차는 최고 2m이상이므로 제 1 굴절면의 심도분포를 나타내려면 전체 대상지역을 동일한 높이로 고도보정을 해 주어야 한다. 하부층의 속도분석은 고도차에 의한 효과를 최소화 하기 위해 고도보정 후에 동일한 방법을 통해 행해졌다. 그 결과 하부층의 P파 속도는 1550~1940m/s의 분포를 보였다.

3.2 역행주시법

역행주시법은 양방향의 주시곡선에서 reciprocity를 이용해 굴절면의 심도 프로파일을 구해내는 방법의 초기형태로서 매우 빠르고 간단하며 그 원리는 다음 식과 같다.

$$t = (t_{AG} + t_{BG} - t_{AB})/2 \quad (1)$$

즉 Fig. 3에서 A점과 B점에 각각 파원이 있고 G점에 지오폰이 있을 경우 A점에서 G점까지 굴절파가 진행하는데 걸린 시간 t_{AG} 와 B점에서 G점까지 굴절파가 진행하는데 걸린 시간 t_{BG} 의 합에서 A점에서 B점까지 굴절파가 진행하는데 걸린 시간 t_{AB} 를 빼서 2를 나누면 G점 하부의 굴절면에서 지표까지 임계각으로 상부층을 전파한 파의 이동시간이 남게 된다. 이것을 그 파의 수직 속도(vertical phase velocity)로 나누어 주면 G점에서의 굴절면의 심도가 나오게 된다.

3.3 GRM

GRM이 역행주시법에 대해 갖는 장점은 계산 시 굴절면의 굴곡에 민감하도록 인자를 조정할 수 있다는 것과 숨은층이 존재하는 경우에도 사용할 수 있다는 것이다. 이 연구에서는 시추자료로부터 하부층이 비교적 유사한 암반층으로 연속되는 것을 확인한 바 숨은층에 대한 가능성은 배제하였다. 굴절면의 굴곡에 민감하도록 조정하는 과정은 다음과 같다. Fig. 3에서 보듯이 굴절파 초동기록은 굴절면으로부터 임계각에 해당하는 점에서 출발하여 지표에 도달한 파의 정보이므로 G점 직하부의 굴절면에 대한 정보는 담고 있지 않다. 따라서 실제의 굴절면의 굴곡이 왜곡되어 나타날 가능성이 있으며 이 경우 왜곡은 Fig. 5(a)와 유사한 형태로 나타난다. GRM은 역행주시법을 일반화시켜 지오폰 하나대신 두 개에 대한 정보를 이용한다. (Fig. 4) 주목하고자 하는 지오폰 두 개의 설치 거리 XY를 조정함으로써 이러한 왜곡의 방향을 조정할 수 있는데 다음의 속도분석 함수가 이것을 가능하게 해 준다.

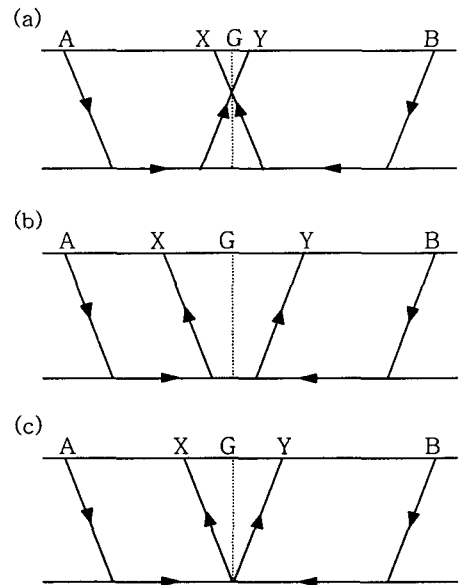


Fig. 4. Generalized Reciprocal Method

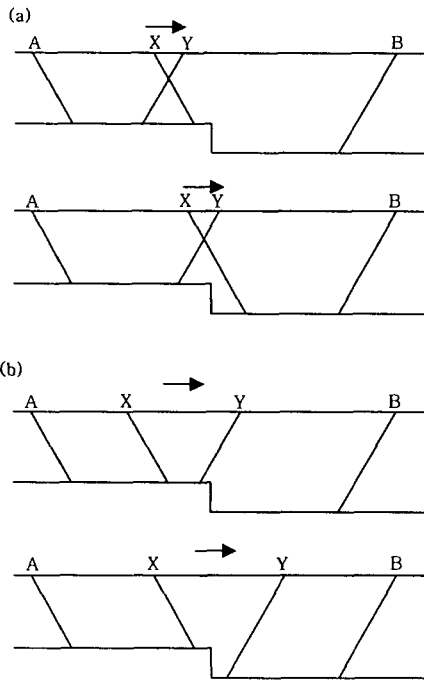


Fig. 5. Process of the velocity analysis function in GRM

값이 최적값보다 클 경우 (Fig. 4(b)의 경우) AY경로를 진행하는 파가 먼저 두꺼운 저속도층을 지나게 되어 양의 왜곡을 보이게 되는 과정을 보여주고 있다. Fig. 4(c)의 경우와 같이 굴절면의 같은 점에서 출발한 양 방향의 굴절파가 도달하는 곳을 각각 X, Y로 잡을 경우 속도분석 함수에서 이러한 왜곡은 사라지고 가장 선형에 가까운 모습을 갖게 될 것이다. 결국 GRM에서 찾고자 하는 최적의 XY값은 Fig. 4(c)의 경우인 것이다.

그러나 이러한 굴절면 굴곡에 대한 GRM의 예민성은 그 굴곡이 완만한 경우에는 오히려 XY값의 변화에 대해 속도 분석 함수가 무디어지는 경향이 있다. 이 경우 속도분석 함수에 나타나는 왜곡들이 명확하지 않아 정확한 XY값을 선택하기가 용이하지 않으므로 굴절면 분해능의 향상을 기대하기 어렵다. 게다가 여러 개의 XY값에 대한 속도분석 함수를 그려서 이를 육안으로 확인해야 하는 번거로움은 여전히 남아있으므로 GRM 해석법 사용을 재고해 볼 필요가 있다. 이미 수행한 속도분석과 역행주시법의 결과로부터 우리는 대략의 XY값을 추정할 수 있다. 역행주시법에서 얻어진 측선 8에 대한 제 1굴절면의 평균심도는 4.10m이다. 이것으로부터 최적의 XY값은 다음 식으로 구해질 수 있으며 이것은 임계거리와 (critical distance) 동일한 값이다.

$$XY = 2h \tan \theta_c \quad (4)$$

여기서 $h = 4.10\text{m}$ 이고 θ_c 는 임계각으로서 Table. 1에서 주어진 측선8의 속도구조로부터 8.27도의 값을 얻는다. 따라서 XY값은 1.19m가 되고 이에 $XY = 1\text{m}$ 를 적용하여 시간

$$t_v = (t_{AY} - t_{BX} + t_{AB})/2 \quad (2)$$

여기서 t_{AB} 는 결과값이 음수가 나오는 것을 피하기 위해 더해 주었고 t_{AY} 와 t_{BX} 는 G 가 증가함에 따라 그 기울기가 t_{AY} 의 그것의 2배 정도가 되기 때문에 2로 나누어 주었다. 그리하여 Palmer는 식 (3)과 같이 속도분석 함수의 기울기가 해당 굴절면의 겉보기 속도, 즉 수평방향 속도 V_n' 의 역수가 된다고 정의해 놓았다.

$$\frac{d}{dx} t_v = \frac{1}{V_n} \quad (3)$$

이 속도분석 함수는 Fig. 5(a)에서 보여지듯이 Fig. 4(a)에서 처럼 XY값이 최적값보다 작을 경우 G 가 증가함에 따라 선형으로 증가하다가 굴절면의 심도가 깊어지는 수직단층을 가로지르는 순간 BX경로를 진행하는 파가 먼저 두꺼운 저속도층을 지나게 되고 따라서 t_{BX} 가 먼저 커지면서 음의 왜곡을 보이게 시작한다. 그러다가 AY경로를 진행하는 파가 뒤따라 단층을 지나면서 속도 분석 함수는 다시 선형증가로 돌아서게 된다. Fig. 5(b)는 XY

Table. 1. Estimated P-wave velocities

LINE	$V_1(\text{m/s})$	$V_2(\text{m/s})$
1	288	1,621
2	329	1,505
3	273	1,977
4	305	1,790
5	299	1,645
6	364	1,571
7	322	1,869
8	280	1,946
9	309	1,748
10	310	1,551
AVERAGE	307	1,722

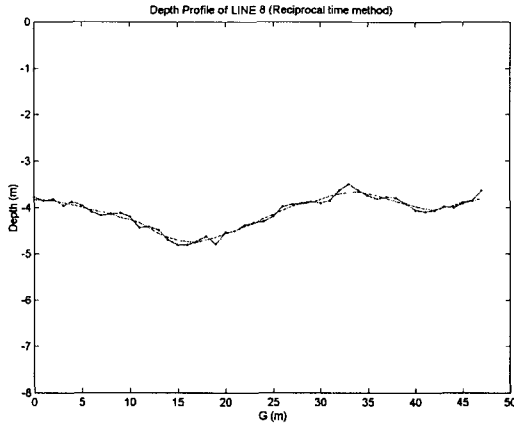


Fig. 6. Depth profile obtained with reciprocal time method

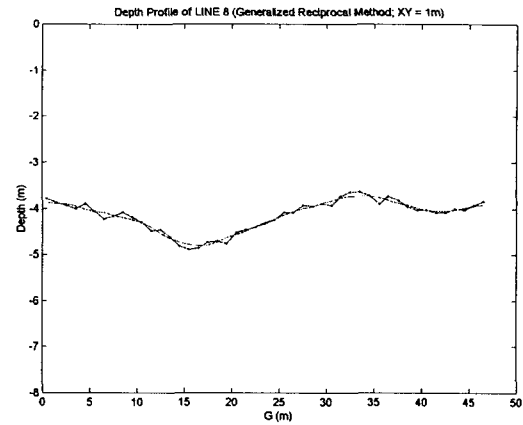


Fig. 7. Depth profile obtained with GRM

깊이 함수에 상부층에서의 수직상속도를 곱해서 얻은 심도 프로파일은 Fig. 7과 같다. 이것은 Fig. 6의 역행주시법에서 얻은 결과와 거의 같음을 보인다. 이처럼 전 지역에 걸쳐 굴절면의 경사가 5도 미만이며 굴절면의 굴곡이 완만하여 최적의 XY값을 찾기가 어렵고, 상하부층의 속도차가 커서 임계각이 작아져 굴절면의 정보손실이 적을 경우에는 역행주시법을 사용하는 것이 간편하고 합리적이라고 판단되었다. 이에 따라 차후의 다른 측선에 대한 자료처리는 역행주시법으로 행해졌고 주시 토모그래피로 굴곡 모양에 대한 검증을 시도하였다.

3.4 주시 토모그래피

본 연구에서는 파선의 굴곡을 고려하는 비선형 토모그래피를 사용하였다. 비선형 토모그래피에서는 모델변수의 해를 보정하기 위하여 다음과 같이 표현할 수 있다. (Berryman, 1989)

$$\Delta t_i \approx \int \Delta s dl \quad (5)$$

이것을 행렬로 구성하면 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta t = L \Delta s \quad (6)$$

비선형 토모그래피에서는 모델변수를 갱신하면서 반복적으로 파의 도달시간과 파의 경로가 계산되어야 하므로 많은 계산시간이 요구되어지고 따라서 빠른 도달시간 및 파선경로를 구하는 알고리즘을 필요로 한다.

3.4.1 초등계산 및 파선 추적법

Vidale(1988)은 일반적인 shooting 방법이 아닌 eikonal방정식의 유한차분해로써 모델영역 전체에 대한 파선 추적을 계산해 내었다. 그러나 그의 방법은 정사각형으로 계산영역을 확장하는 관계로 속도차가 배 이상이 되는 경우에는 유인성(causality)이 위배되어 굴절면에 의한 최소주시를 계산해내지 못하는 단점이 있다. 따라서 실제 파동의 확산을 묘사하고 있는 파면확장법을 이용하여 초등계산을 수행하였다. 파선경로는 이로부터 계산된 주시에서 얻을 수 있으며 이두성(1994)의 FD-FD법을 사용하였다. 이 방법은 지오폰으로부터 파의 진행방향을 역으로 주위 네 개의 격자점의 주시로부터 추적하며 진행하는

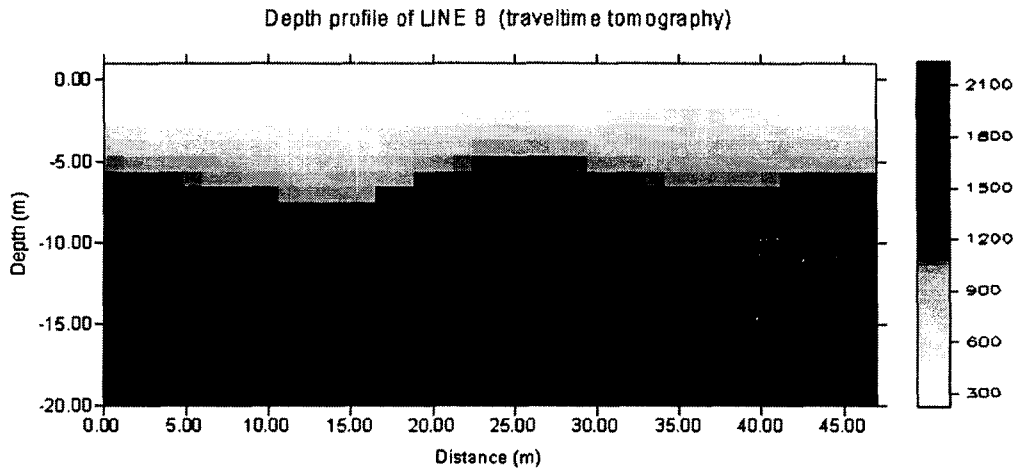


Fig. 8. Depth profile obtained with traveltime tomography.

것이며 이렇게 얻은 파선추적의 정확도는 주행시간 산출의 정확도와 같게 된다.

3.4.2 역산법

행렬식을 푸는 역산 수행 시 메모리를 절약하기 위해 본 연구에서는 반복적인 역산의 하나인 SIRT를 사용하였다. 이것은 투영법의 하나인 ART(Algebraic reconstruction technique)을 변형한 것이다. ART는 매 반복 단계에서 연립방정식을 이루는 각각의 평면위로 순차적인 투영을 해가면서 모델변수를 갱신해 가는 것임에 반해 SIRT는 초기치의 한 점에서 모든 평면에 대하여 사영을 구하고, 이 사영 벡터들의 평균을 다음 단계의 초기치로 활용하며 이 과정을 반복하면서 해를 구하여 가는 과정이다.

3.4.3 결과

파선추적의 유한차분해를 구하기 위해 매 축선에 대해서 40*80의 격자공간을 만들고 초기 모델변수로써 탄성과 속도 2000m/s로 균질하게 주었다. 역산을 수행하기 위해 47m*20m를 40*22개의 블록으로 나누었으며 30회 반복계산을 통해 모델변수를 갱신하였다. 주시 토모그래피를 수행함에 있어서 굴절면의 정확한 위치와 굴절면을 따라 파가 진행하는 것과 같은 구조를 주지 않았으므로 모든 심도에 대해서 비교적 부드러운 속도의 변화를 나타내는 것을 알 수 있다. (Fig. 8) 그러나 속도분포 굴곡의 양상을 고려한다면 역행주시법에서 얻어진 굴곡과 거의 비슷하게 나오는 것을 볼 수 있다.

4 결과 및 해석

역행주시법으로 얻어진 각 축선에서의 깊이 정보를 참고로 역거리 내삽법 (inverse distance interpolation)을 이용해 고도자료를 3D로 확장하였다. 즉 축선 위치의 깊이 정보를 참고점으로 입력해 두고 깊이 정보가 없는 임의의 위치에서 깊이를 구하고자 할 때, 깊이를 구하고자 하는 점을 원점으로 하는 4사분면을 정하고 각 4분면에서 원점과 가장 가까운 참고점을 하나씩 찾아낸다. 찾아진 점들의 원점으로부터의 거리와 깊이 정보로부터 원점의 거리의 역수에 비례하는 가중치를 적용하여 원점에서의 깊이정보를 구하는 것이다. 이렇게 확장된 깊이 정보는 굴절면 정보정을 위한 입력 자료로 활용될 것이다. 계산된 굴절면의 굴곡은 지표면의 굴곡의 모양과 유사하게 나타나고 있다. Fig. 9(a)는 지표면의 굴곡을 나타내고 있고, Fig. 9(b)는 역행주시법으로 계산한 제 1굴절면의 굴곡을 표시한 것이고, Fig. 9(c)는 주시 토모그래피의 결과를 모아놓은 것이다. 주시 토모그래피의 계산 결과는 지하 20m까지 파선이 통과하므로 모델범위를 그대로 두어 수직 범위가 Fig. 9(a), (b)와는 다르게 표시되어있다. Fig. 9(b), (c)는 (a)의 굴곡과 유사한 형태를 보이고 있다. 이것은 상부로 전파된 지반 이완의 연속성으로 판단된다.

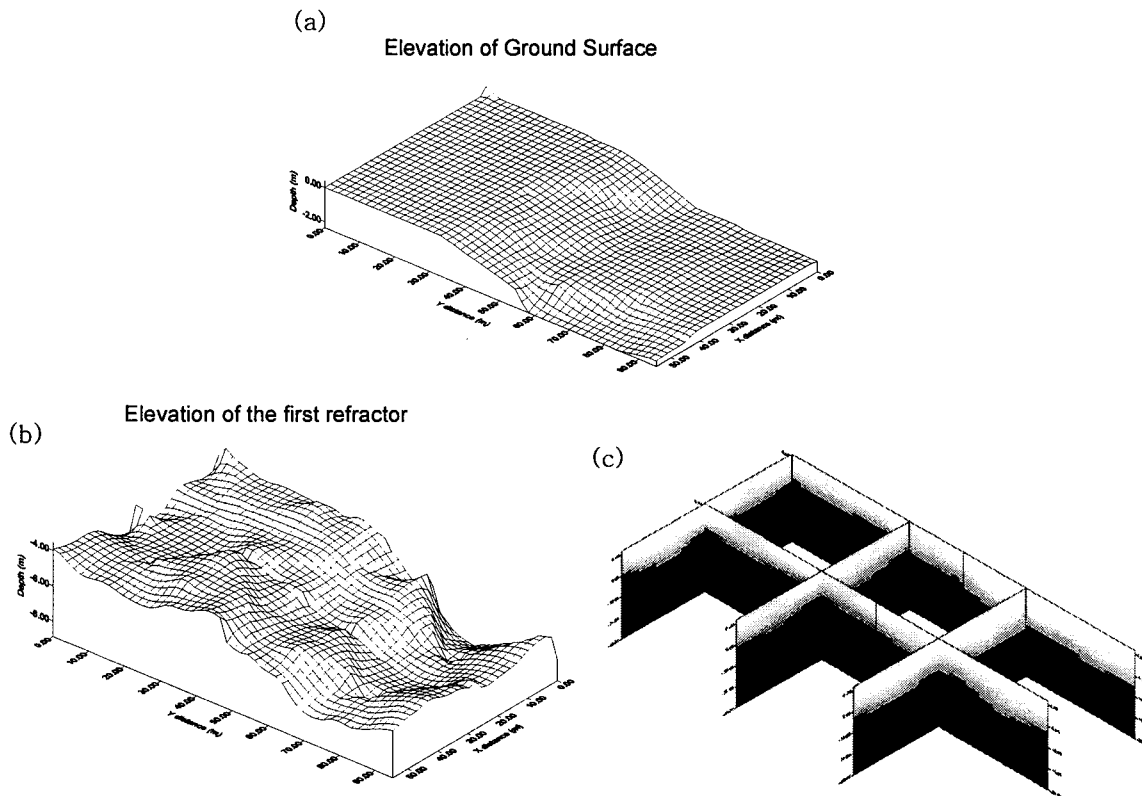


Fig. 9. Result of data processing (a) topography of the survey area, (b) the surface of the first refractor, (c) result of travel time tomography. The vertical scale of (c) is 4.4 times the vertical scale of (a) and (b)

따라서 이 지역에 나타난 지반침하의 형태는 비교적 넓은 범위에 걸쳐 홈통 모양으로 일어난 trough형 침하로 분류될 수 있다.

5 결론 및 토의

강원도 삼척시 도계읍 마교리의 오십천의 북쪽으로 영동선 철도 하부 남풍갱 부근에서 지하채굴적 붕괴의 양상을 파악하기 위하여 3D 탄성파 반사법 탐사가 수행되었고 이에 앞서 표토층의 영향을 제거하기 위해 10개의 측선을 깔아 2D 굴절법 탐사를 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표토층은 P파 평균속도 307m/s 를 갖는 마른 토사층으로 사료되며 그 하부 경계면은 3.49m에서 8.88m의 심도로 분포하고 있다. 그러나 이러한 변화는 북동-남서 방향으로 나타나고 있으며 이 방향의 전체 길이는 94m로서 경계면의 굴곡은 5 미만 작은 값을 보이고 있다.
2. 하부층은 상부층과 뚜렷한 속도차이를 보이며 P파 평균속도 1722m/s 로 계산되었다. 제 3층의 존재는 확실하게 보이지 않으며 풍화된 암반이 상당한 깊이까지 계속되는 것으로 추정된다. 또한 이러한 현상은 영동선 철도를 따라 실시되었던 시추자료의 결과와 부합하는 것으로 생각된다.
3. 동일한 측선에 역행주시법과 GRM을 적용하여 거의 같은 결과를 얻었으며 시추자료를 근거로 GRM사용 시 숨은층은 고려하지 않았다. 본 연구지역은 굴절면의 굴곡이 완만하여 최적의 XY값을 찾는 것이 쉽지 않았고 각기 다른 XY값에 대해 시간값이는 별로 변화를 보이지 않았다. 따라서 본 연구에서는 GRM 사용이 갖는 장점 (급경사와 숨은층 탐색) 을 얻을 수 없었다.
4. 역행주시법 결과를 취합하여 역거리 내삽법으로 확장한 결과 굴절면의 굴곡은 상부 지표면의 굴곡의 모양을 약간 더 과장한 모양을 하고 있었다. 이러한 양상은 본 연구지역의 북동쪽으로 넓은 trough

형 침하가 나타나고 있는 것으로 보고되고 있는 이전의 지반조사 결과와 부합하는 것으로 판단된다. 이렇듯 습곡이 아니면서도 상하부층의 굴곡이 동일한 변화를 보이는 경우는 하부지반 이완에 따른 전형적인 침하의 형태로 분류될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 이러한 침하의 양상이 영동선 철도의 하부를 가로지르는 형태로 나타나고 있으므로 이에 적합한 지반보강 대책이 요구된다.

GRM사용 시에 깊이 프로파일에 대한 정보를 독립적으로 얻을 수 있는 경우 습은층의 존재여부에 대한 판단을 더욱 확실하게 할 수 있는데 예를 들어 선택된 XY값이 식(4)를 이용하여 제 1굴절면의 깊이 h 로부터 구한 XY값보다 클 경우 습은층의 존재를 예상할 수 있다. (Palmer, 1981; Lankston, 1989) 그러나 본 연구에서 수행된 역행주시법은 GRM의 특수한 경우로서 독립적인 다른 정보라 할 수 없는 관계로 습은층 판단 시에 고려되지 않았고 방법의 효율성만이 비교 대상으로 다루어졌다. 습은층의 판단은 영동선 철로를 따라 이전에 수행되었던 시추자를 근거로 추론한 것이다. 그러나 보다 정확한 습은층에 대한 판단을 위해서는 각 측선 위치에서의 시추자료가 확보되어야 할 것이다.

주시 토모그래피 적용에 있어서 역행주시법에서 조사된 바와 비슷한 속도구조의 모델을 초기치로 주었을 때는 수렴속도가 더 빨랐으나 완전히 독립적인 접근을 시도하기 위해 초기치를 전체 모델에 2000m/s로 동일하게 준 것이다. 따라서 이 경우에 비교적 부드러운 속도구배를 갖는 결과를 나타내므로 파선 추적 시 Vidale의 방법을 사용해도 동일한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 국가지정연구실 사업과제 “탄성과 영상화 기술 연구개발 및 응용”의 일부로 수행하였다. 한국과학기술평가원의 재정적 지원에 감사한다.

참고문헌

1. 이두성(1994), "유한 차분법에 기초한 파선 경로 계산 알고리즘", 한국자원공학회지, 제 31권, pp.150~155.
2. 청석엔지니어링(1996), **고사리지역 지반안정성 조사**, 석탄산업합리화사업단, 서울.
3. Berryman, J.G.(1989), "Fermat's principle and nonlinear travelttime tomography", *Physical Review Letters*, Vol. 62, pp.2953~2956.
4. Dines K.A. and Lytle R.J.(1979), "Computerized geophysical tomography", *Proc of IEEE*, Vol. 67, pp.1065~1073.
5. Hawkins, L.V.(1961), "The reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations", *Geophysics*, Vol. 26, pp.806~819.
6. Hawkins, L.V. and Maggs, D.(1961), "Nomograms for determining maximum errors and limiting conditions in seismic refraction surveys with a blind zone problem", *Geophysics*, Vol. 9, pp.526~532.
7. Lankston, R.W.(1989), "The seismic refraction method: a viable tool for mapping shallow targets into the 1990s", *Geophysics*, Vol. 54, pp.1535~1542.
8. Cox, M.(1999), *Static Corrections for Seismic Reflection Surveys*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
9. Palmer, D.(1981), "An introduction to generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation", *Geophysics*, Vol. 46, pp.1508~1518.
10. Qin, F., Olsen, K.B., Cai, W., and Schuster, G.T.(1992), "Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts", *Geophysics*, Vol. 57, pp.478~487.
11. Vidale, J.(1988), "Finite-difference calculation of travel times", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, pp.2062~2076.