지구물리 제 5 권 제 1 호, p. 41-50 (2002년 3월)

경주시 감산사단층 부근에서의 탄성파 굴절법 조사

김기영 · 김동훈
강원대학교 지구과학부

요 약

경주시 감산사 부근에서 발견된 제4기 단층 부근의 기반암 분포를 확인하기 위하여 188 m 측선의 굴절파 자료를 4 m 간격으로 획득하였으며, 토모그래피 역산을 통하여 350 m/s, 600 m/s, 1,100 m/s, 2,400 m/s의 속도를 갖는 4개 층을 구명하였다. 주변지질을 감안하여 속도분포를 분석한 결과, 원점에서 40 m 부근에 역단층이 존재하며 북북서쪽으로 단층파쇄대가 존재하는 것으로 해석된다.

주요어: 제4기 단층, 기반암 분포, 토모그래피 역산, 역단층, 단층파쇄대

Ki-Young Kim and Dong-Hoon Kim, 2002, A Seismic Refraction Study near the Gamsansa Fault in Gyeongju, Korea. Journal of the Korean Geophysical Society. v. 5, n. 1, p. 41-50

ABSTRACT: In order to delineate distribution of the basement in the vicinity of a Quaternary fault outcrop near the Gamsansa temple in Gyeongju, we conducted a seismic refraction survey along a 188 m profile with a 4 m receiver interval. Through tomographic inversion, we define four layers with refraction velocities of approximately 350 m/s, 600 m/s, 1,100 m/s and 2,400 m/s, respectively. We depict a reversed fault at a location of 40 m apart from the base station of the profile and interpret a fracture zone related to fault movements in the NNW of the profile.

Key words: Quaternary fault, distribution of the basement, tomographic inversion, reversed fault, fracture zone

(Ki-Young Kim and Dong-Hoon Kim, Division of Earth Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea, e-mail: kykim@kangwon.ac.kr)

1. 서 론

부산, 울산, 포항 등 대도시가 밀집되어 있는 한반도 남동부에서 지난 십여년간 제4기 단층들이 많이 발견되었으며, 이들의 연장과 규모는 주변 원자력발전소 및 대규모 중화학 공업단지의 안정성 여부와 관련하여 큰 관심을 모으고 있다.

이러한 제4기 단층의 지하 지질구조 및 연장성을 파악하기 위해서는 지표의 노두조사만으로는 한계가 있으며, 지구물리학적 조사방법을 이용하여 효율적으로 조사할 수 있다. 제4기 단층 탐지 및 지하지층 특성을 밝히기 위한 지구물리학적 방법 중, 탄성파 굴절법은 반사법보다 분해능이 떨어지는 문제점은 있으나, 비교적 규모가 큰 단층을 적은 노력으로 탐지할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 탄성파 굴절법은 해석 정밀도가 높아야 하며, 복잡한 지하구조에서도 해석이 가능해야 한다(유영준 외, 2001). 그러나 GRM 방법(Palmer, 1980)을 포함한 기존의 굴절파 조사방법들은 저속도층(low velocity layer)과 얇은층(thin layer)을 구명하는데 한계가 있으며, 또한 층구조를 가정하기 때문에 지형변화가 심하고 속도가 수평방향으로 크게 변하는 복잡한 지반환경에서는 정확하게 속도구조를 구하기 어려운 문제점이 있다.

이러한 문제점은 1917년 Radon에 의해 발표된 토모그래피 개념(Deans, 1983)을 굴절파 자료해석에 Hampson and Russell(1984)이 처음 도입함으로써 굴절파 탐사법에 새로운 전기를 맞게 되었다. Docherty(1992)는 풍화대층의 두께와 속도를 밝히기 위하여, Lanz *et al.*(1998)은 매몰된 폐기물 처리장의 깊이와 형태를 구명하기 위하여 각각 굴절파 토모그래피 방법을 사용하였다. Ditmar

et al.(1999)은 천부 반사파와 굴절파 자료를 동시에 활용하는 방법을 발표하였으며, Hayashi and Takahashi(2001)는 지표 및 시추공에서 측정한 굴절파 자료를 토모그래피 방식으로 해석하여 암석의 특성을 밝히는 방법을 개발한 바 있다.

이 논문에서는 굴절파 토모그래피 해석법을 이용하여 경주시 외동읍 감산사 지역에서 발견된 제4기 단층 주변의 기반암 분포를 밝히고, 화강암인 상반이 제4기층 위로 이동한 역단층의 형태가 탄성파 굴절법 자료에서 어떻게 나타나는지에 대해 연구한다.

2. 이론적 배경

많은 파원과 수신기가 놓여 있는 지하매질의 속도분포를 초동을 이용하여 구하는 방법인 굴절파 토모그래피의 원리는 위에 소개한 여러 논문들에 기술되어 있으나, 처리과정 등의 설명을 효율적으로 하기 위하여 간략히 기술한다.

수평 2층 구조에서의 파원으로부터 거리 x 만큼 떨어진 수신기에서의 굴절파 초동시간 t는

$$t = 2zs_1 \cos\theta_i + xs_2 \tag{1}$$

로 표시할 수 있으며, 여기서 s_i와 θ_i는 각각 i번째 층의 역속도(slowness)와 임계각이다.

$$c = s_1 \cos\theta_i \tag{2}$$

라 하면, 식 (1)은

$$t = 2cz + xs_2 \tag{3}$$

로 간단히 표시할 수 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 굴곡이 있는 경계면에서의 굴절파 초동 도달시간 t_i는

$$t_i = c_1 z_1 + c_2 z_2 + x_i s_2 \tag{4}$$

$$c_1 = c_2 = s_1 \cos\theta_i \tag{5}$$

이므로, 일반적으로 j번째 수진점에서 기록된 i번째 초동 주시는

$$t_i = \sum_{j=1}^{n} c_{ij} z_j + x_i s_2 \tag{6}$$

$$c_{ij} = s_1 \cos\theta_i \tag{7}$$

의 형태로 쓸 수 있다. 식 (6)과 (7)을 이용하여 최소자승법으로 n개 수진점에서의 두께 z_j를 구한다.

초동주시는 파선경로에 따라 역속도(slowness)를 적분하면 구할 수 있는 문제이므로 파선경로를 안다면 속도분포를 쉽게 구할 수 있다. 그러나 실제로는 굴절파 파선방향이 속도분포에 따라 변하므로 근본적으로 비선형의 문제가 되며, 이러한 비선형의 문제는 주시를 구하기 위한 순차모델과 선형역산 과정을 반복적으로 사용하는 반복적 선형역산법으로 극복할 수 있다(Hampson *et al.*, 1984).

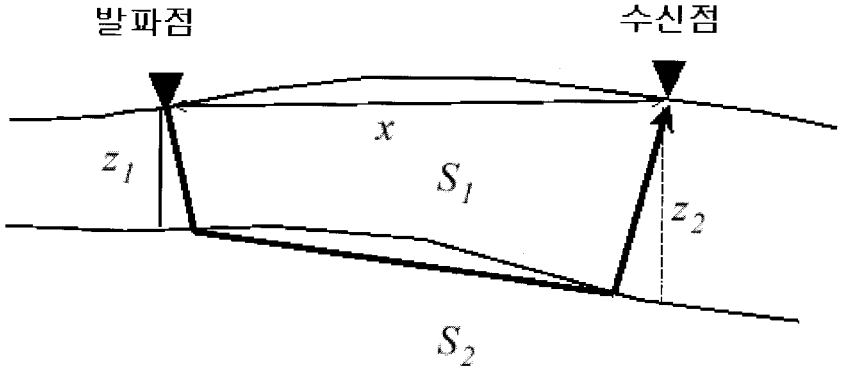

Fig. 1. Raypath refracted from a boundary.

주시순차모델은 Aki and Richard(1980)가 소개한 전통적인 파선추적법인 발파법(shooting method), Um and Thurber(1987)가 제안한 파원과 수신점을 잘 연결할 수 있는 휨방법(bending method), Vidale(1988)의 유한차분법(finite difference method)을 이용한 방법, 그래프 이론법(Moser, 1989) 등이 있다. 이 연구에서는 최근 Saito(2001)가 소개한 호이겐스 원리를 응용한 방법을 사용하여 주시순차모델을 구하였다.

속도분포를 구하기 위한 역산법은 BPT(Back Projection Technique), ART(Algebraic Reconstruction Technique), SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) 등이 널리 알려져 있다. 이중 본 논문에서 사용된 SIRT 역산법은 주어진 셀을 통과하는 모든 파선에 대한 보정 값을 동시에 계산한 후, 모든 셀에 대한 보정 값이 계산되면 이를 각각의 셀에 대해 동시에 보정하는 과정을 반복하여 오차를 줄여나가는 방법이다.

이 SIRT 역산법에서는 j번째 셀의 역속도(slowness) 보정값(ΔS_j)을

$$\Delta S_j = \sum_i (T_i^{0-c} l_{ij} S_j / T_i^c) / \sum_i l_{ij} \qquad (8)$$

로 나타낼 수 있는데, 여기서 S_j는 j번째 셀의 역속도이고, l_{ij}는 j번째 셀을 통과하는 i번째 파선의 길이이다. T_i^{0-c}는 i번째 파선의 주시잔차(traveltime residual)이고, T_i^c는 i번째 파선의 계산된 주시이다. 반복수행과정에서 셀의 역속도(혹은 속도)가 계속 보정된다.

이렇게 구한 역산 결과를 간단하면서도 적절한 층 모델의 형태로 나타낼 수 있으며, 이 경우 역속도 뿐만 아니라 층 두께에 대한 역산도 함께 구해야 한다(Hayashi and Takahashi, 2001).

3. 지형 및 지질

이 논문의 조사지는 경상북도 경주시 외동읍 괘릉리 감산사 부근으로, 서쪽 약 1.5 km 지점에 경주와 울산을 연결하는 7번 국도가 거의 남북으로 놓여있고 동쪽으로는 토함산(745 m)에서 삼태봉(629 m)을 연결된 남북방향의 산맥으로 형성되어 있다(Fig. 2). 조사지는 계곡으로 이 계곡을 따라 흐르는 하천을 막아 저수지를 만드는 공사 현장이었으나, 조사 당시는 중단된 상태였다.

이 지역은 연일구조선상(김인수 외, 1998; 손문

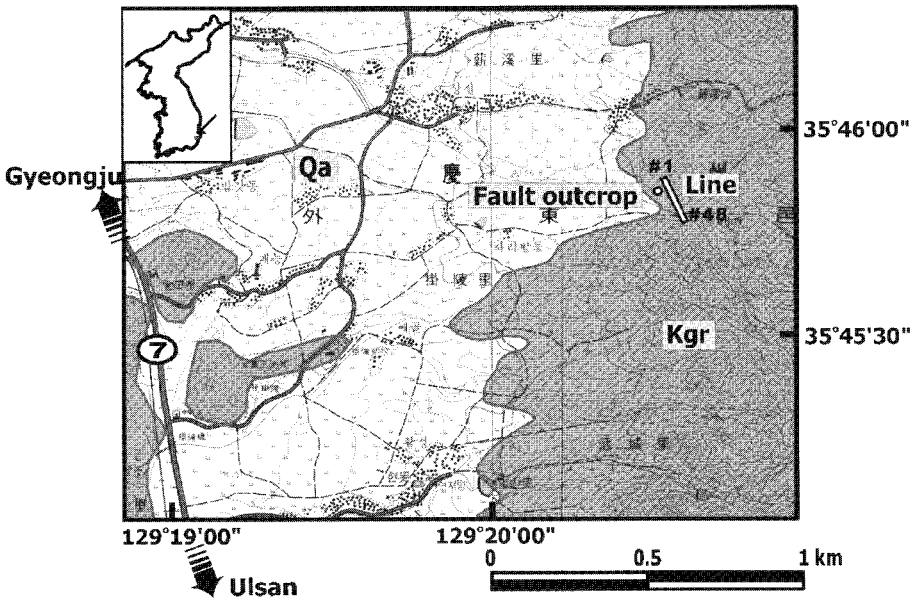

Fig. 2. Location and simplified geology of the study area (modified from KIGAM, 2000). Abbreviations Kgr and Qa represent biotite granite and Quaternary layer, respectively.

외, 1999)상에 위치하며, 조사측선 주변의 지질은 동쪽으로는 중생대 백악기에 생성된 흑운모 화강암이, 서쪽으로는 신생대 제4기에 생성된 흙, 모래, 자갈 등의 퇴적층이 발달되어 있다(한국지질자원연구원, 2000). 감산사 부근 하천변에서 발견된 단층은 기반암인 불국사화강암이 제4기층 위로 이동한 역단층의 형태를 보인다. 주향 N60°E, 경사 30°SE인 이 단층 상반은 화강암이 10 m 이상의 폭으로 심하게 파쇄되어 있고, 층면 하반의 제4기 자갈층은 분급이 매우 나쁘며 층리면이 잘 인지되지 않는 특성이 있다(장태우, 2001).

4. 자료획득

경주시 감산사 부근의 제4기 단층노두 위치와 현장 지형을 고려하여 측선을 설정하고 굴절파 자료를 획득하였다. 측선은 단층노두로부터 최단거리 약 25 m 떨어진 곳에 단층 주향과 수직에 가깝도록 비교적 평탄한 북북서-남남동(N26°W)방향으로 정하였다. 측선의 길이는 188 m로 광파측량기를 이용하여 4 m 간격마다 측점의 고도와 거리를 정밀하게 측량하였다. 측선상의 최대 고도차는 3 m 이내로 비교적 평탄한 지형을 보이고 있다. 측선의 북북서쪽 끝부분은 절개된 상태이며, 측선 중앙부는 계곡을 일부 성토한 매립구간이었다. 또한 측선 옆으로는 하천이 흐르고 있었는데, 이 하천은 측선의 남남동쪽으로 갈수록 가까워지며, 하천에 가장 가까운 측점의 수신기에는 하천의 물 흐르는 소리가 잡음으로 약하게 기록되었다. 대체로 땅은 젖어 있었으나 측선의 남남동쪽은 자갈이 많이 포함되어 있는 단단한 지표를 이루고 있다.

24채널 수신기전개 2개의 양단, 1/4점, 중앙점, 3/4점 및 양단에서 20 m 떨어진 원격 2개점 등 모두 14개 타격점에서 5 kg 해머로 알미늄판을 타격하여 지진파를 발생시켰다. 각 발파점마다 5회씩 타격하여 신호/잡음비를 높혔다. 수신기는 OYO사와 Bison사의 100 Hz 고해상도 지오폰을 각각 24개씩 모두 48개를 사용하였으며, 기록계는 OYO사의 McSeis-SX를 사용하였고, 수신된 신호를 0.2 ms 간격으로 총 204 ms 동안 필터를 사용하지 않고 기록하였다(Table 1).

5. 자료처리

획득된 자료는 OYO사의 상업용 소프트웨어인 SeisImager/2D(OYO, 2000)를 이용하여 처리하였으며, 포맷변환, 파원-수신기 배치정보 입력, 초동선택, 속도분석, 고도자료 입력, 지연시간법을 이용한 지하구조 해석, 토모그래피 역산, 층 모델화 등의 순으로 진행되었다(Fig. 3).

기록계에 수치형태로 기록된 원시자료(Fig. 4a)의 포맷을 자료처리 소프트웨어에서 사용하는 내

Table 1. Acquisition parameters.

Source	5 kg Hammer
Vertical Stack	500%
Receiver	100 Hz Geophone
Receiver Spacing	4 m
Number of Channel	24
Recorder	OYO McSeis-SX
Record Length	204 ms
Sampling Interval	200 μs
Analog Filter	Not Applied
Number of Record	14
Number of Spread	2
Number of Shot	7 per Spread

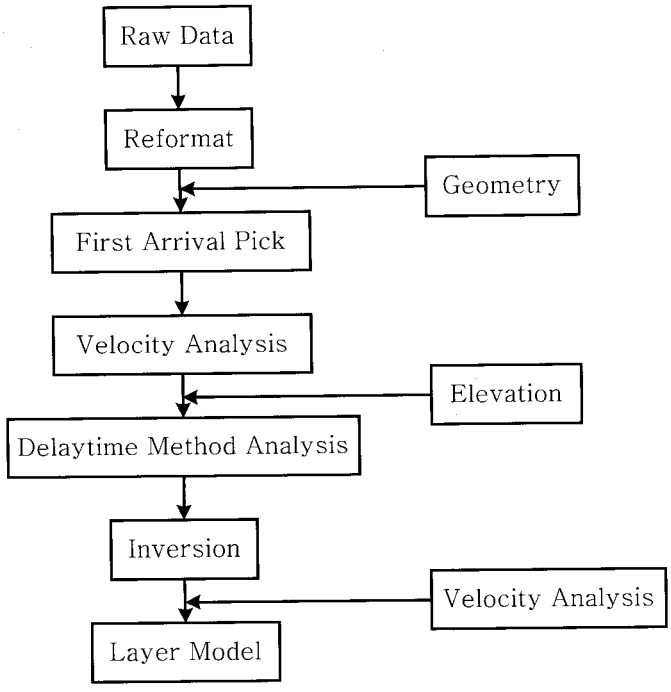

Fig. 3. Sequence for the data processing.

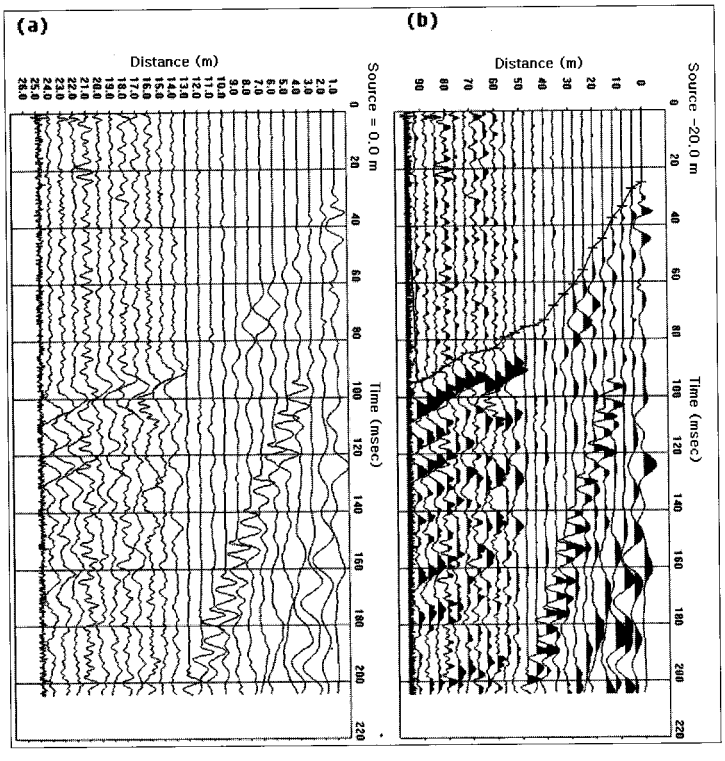

Fig. 4. (a) Raw data and (b) first arrivals picked on the same data.

부포맷으로 변환한 후, 수신기 및 타격점 위치 및 고도 정보를 입력하고 초동을 선택하였다(Fig. 4b). 초동선택은 역산결과에 직접적인 영향을 미치므로 양단주시 일치 및 주시곡선의 평행성에 유념하여 신중하게 선택하였다. 14곳의 타격점에 대한 모든 초동선택 자료를 하나의 파일에 저장한 후, 속도분석과 역산을 수행하였다. Fig. 5는 선택한 초동을 보여주는 주시곡선으로 표층속도는 주시곡선상의 첫 번째 기울기로부터 구하였고, 하부층들의 속도는 수신기 전개별로 선택한 양단 주시곡선에서 구간별로 속도를 분석하였다.

역산 수행을 위한 초기모델은 깊어질수록 속도가 단순히 증가하는 모델로 Fig. 6과 같이 셀의 폭은 수신기 간격과 동일하게 4 m 이고, 수직방향으로는 400-4,000 m/s의 속도 범위를 갖는 15개 층으로 구성하였다. 10번의 반복수행을 거쳐 RMS오차 1.82 ms 이내로 역산을 수행하여 구한 Fig. 7은 초기모델을 대상으로 파선추적을 실시하여 주시를 계산한 후, SIRT 역산방식을 이용하여 얻은 속도분포 결과로써 역산에 사용한 셀과 함

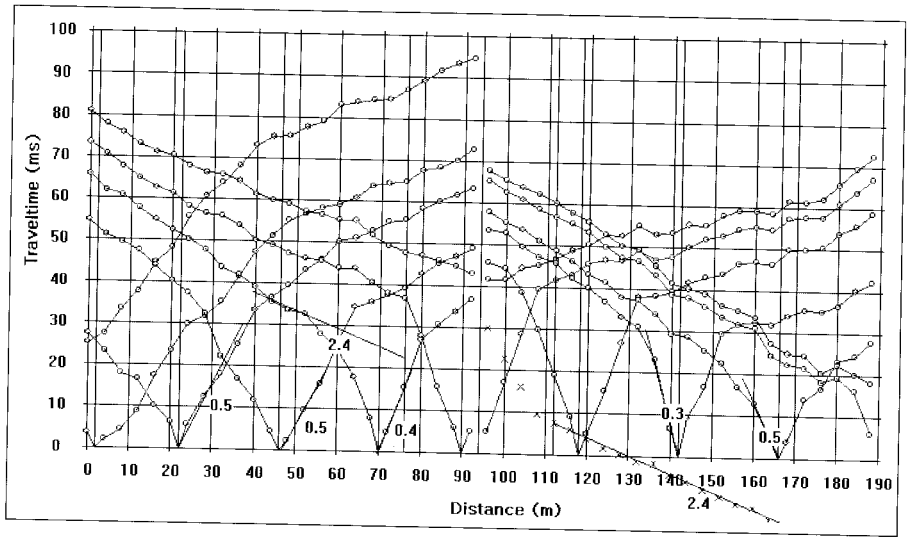

Fig. 5. Traveltime curves and velocity analysis.

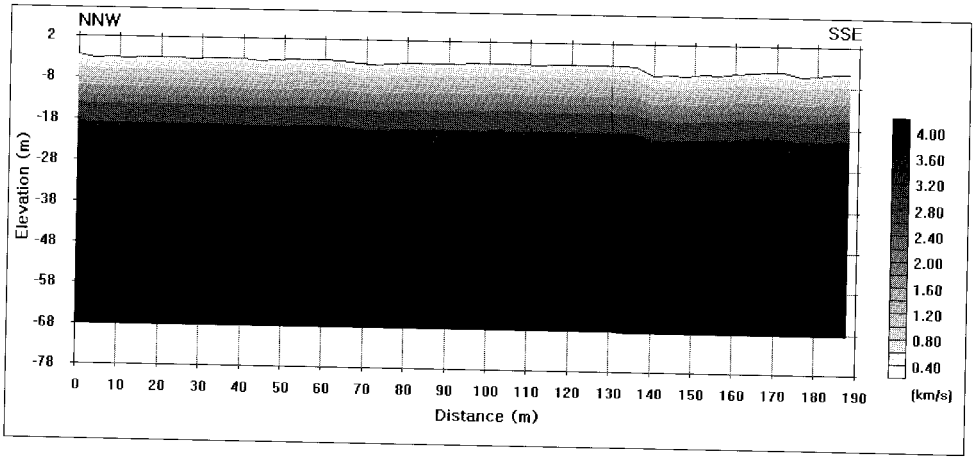

Fig. 6. Initial model for the following refraction traveltime inversion. The model comprises 15 layers whose velocities increase monotonically from 400 m/s to 4,000 m/s.

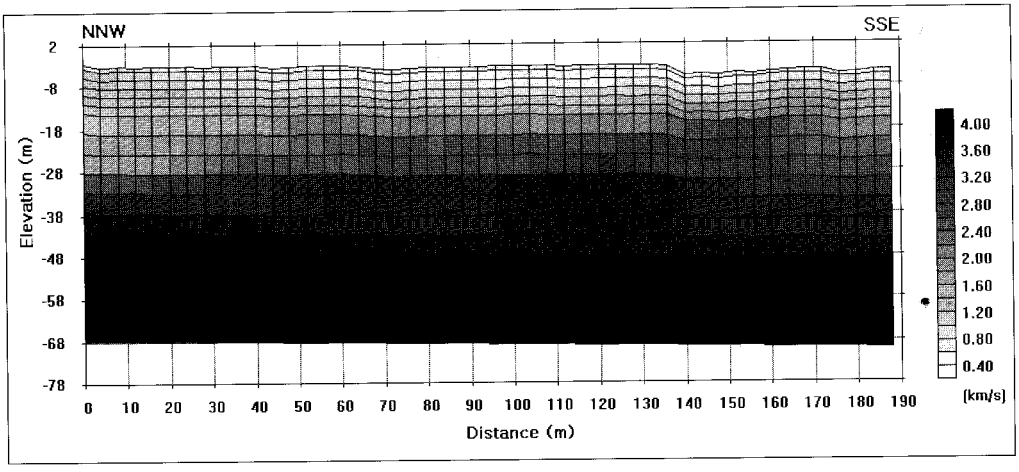

Fig. 7. Inverted velocity tomogram. The width of each cell in black lines is identical to the receiver spacing.

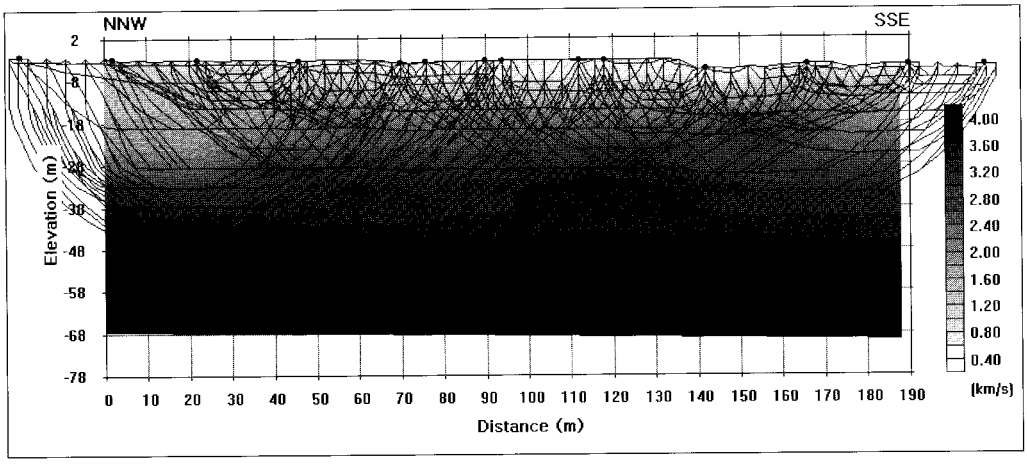

Fig. 8. Moving average output of the tomogram in Fig. 7. And raypath.

께 표시하였다.

모델의 층 숫자는 파선의 수보다 많은 15개로 내삽된 셀들이 포함되어 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 속도토모그램에 가중치 1/4, 1/2, 1/4의 3점 동평균한 결과로 파선경로와 타격점을 함께 표시하였다. 24채널 수신기전개 2개의 양단, 1/4점, 중앙점, 3/4점 및 양단에서 20 m 떨어진 원격 2개점에서 타격한 모든 자료가 역산과정에 사용되었다. Fig. 9는 Fig. 8의 동평균 속도 토모그래피 단면을 등치선도로 나타낸 결과이다. Fig. 10은 Fig. 9의 결과를 적합한 층모델로 구한 결과로써 층들의 역속도와 두께 역산을 위하여 SIRT 알고리즘을 사용하였다(Hayashi and Takahashi, 2001). 속도 토모그램으로부터 층모델을 구하기 위한 층별 속도결정은 현장의 매립지형과 현장노두의 형태 등을 함께 고려하였으며, 몇 가지 모델 중에서 가장 적합한 것으로 판단되는 350 m/s, 600 m/s, 1,100 m/s, 2,400 m/s의 층속도를 갖는 4층모델로 결정하였다.

5. 자료해석

명료한 해석을 위해 구한 층 모델(Fig. 10)은 기반암으로 보이는 속도 2,400 m/s 이상의 층이 북

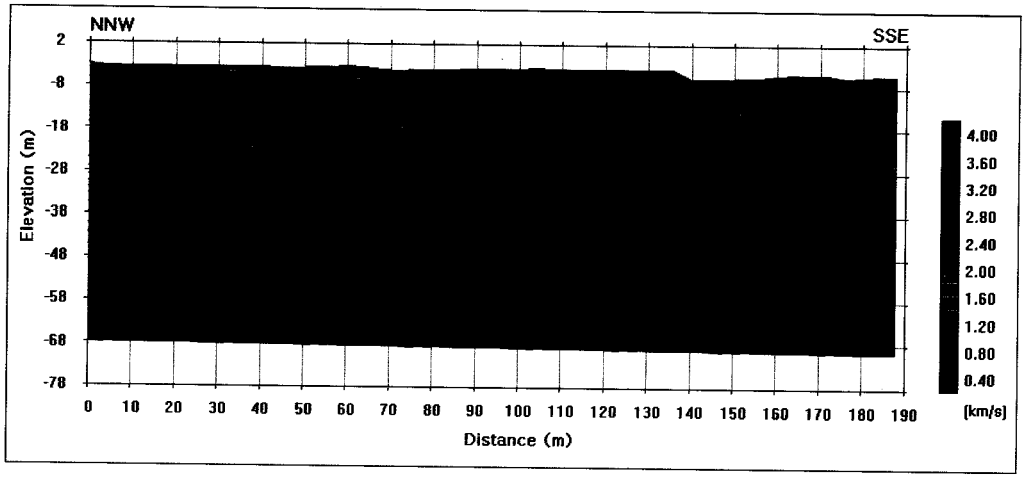

Fig. 9. Contoured seismic velocity profile.

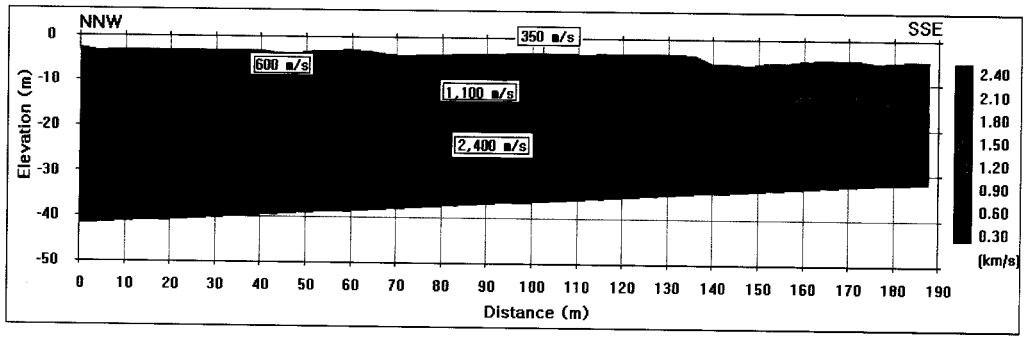

Fig. 10. Layer model constructed based on the refraction tomogram in Fig. 8. Layers with velocities of approximately 350 m/s, 600 m/s, 1100 m/s, 2400 m/s are interpreted as land fills, top soils, Quaternary layer, and basements, respectively.

북서쪽으로 갈수록 깊게 분포하고 남남동쪽으로 얕아지는 분포 특성을 보이는데, 이는 Fig. 9의 속도 토모그램에서와 마찬가지 양상이다. 350 m/s 정도의 속도를 보이는 첫 번째 층은 측선 중앙부의 성토된 부분을 나타내며, 최대 두께 3.8 m로 쌓여 있다. 그 하부의 속도 600 m/s인 두 번째 층은 표토층으로 해석되어지며, 평균 3.4 m 두께로 분포한다. 속도 600 m/s의 이 층과 속도 2,400 m/s를 보이는 기반암 사이에 속도 1,100 m/s 정도의 층이 4.3-22.5 m 두께로 분포하는데, 이 층은 주변 지질을 감안할 때 제4기층일 가능성이 크다.

탄성파 굴절법 조사로 해석되어진 기반암의 분포는 제4기 단층의 직접적인 지질학적 증거를 제시하지 않으나, 이 부근의 제4기 단층 특성이 남동쪽의 화강암이 제4기층 위로 이동한 역단층의 형태임을 감안하면(류충렬 외, 2001), 원점에서 40 m 부근에 역단층이 존재하며, 북북서쪽으로 기반암이 깊어지는 것은 단층파쇄대의 존재와 연관이 있는 것으로 해석된다. 이는 동일한 측선에서 실시한 반사법 조사(김기영 외, 2001)와 전기비저항(이기화, 개인통신) 조사자료 해석결과와 잘 일치한다.

6. 토 의

토모그래피 방법은 층구조를 가정하는 기존의 굴절법 해석 방법과는 달리 속도가 수평적으로도 변하는 복잡한 구조에서도 비교적 정확하게 속도 구조를 도출할 수 있는 반면, 실제로 층상 구조를

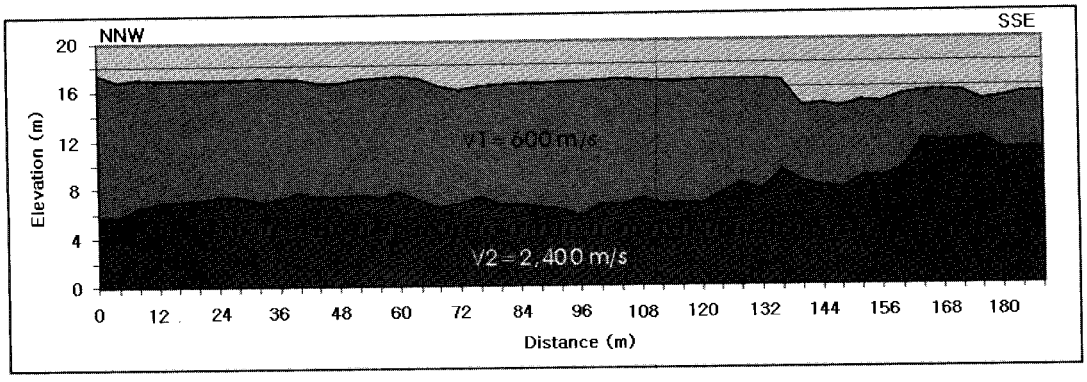

Fig. 11. Interpreted velocity profile based on the delay time method.

갖는 경우 경계면의 위치와 속도를 정하는데 다소 어려움이 있다. 따라서 기존의 해석방법인 지연시간법으로 지하 속도구조를 개략적으로 이해한 후, 속도 토모그램으로 구한 층모델 결과와 비교하였다. 지연시간법으로 해석한 2층 지하구조(Fig. 11)는 600 m/s의 속도를 갖는 상부층이 속도 2400 m/s의 기반암 위에 놓여 있으며, 북북서쪽에서 깊어지는 양상을 보인다. 이는 Fig. 10의 토모그램 층모델의 결과와 일치하나, 350 m/s의 얇은 매립층과 상하부층과 비교적 속도 차이가 작은 1,100 m/s의 층을 구명하는데 한계가 있음을 보인다.

이는 굴절파 토모그래피 방법이 층모델을 가정하지는 않지만, 층모델로 해석코자 할 경우에도 기존의 해석방법보다 효과적으로 사용될 수 있음을 보인다. 다만, 역산결과에 결정적 영향을 미치는 초동을 정확히 선택하기 위하여 자료 획득시 높은 신호/잡음비를 유지하여야 하고, 가능한한 지하매질에 파선이 많이 지나갈 수 있도록 높은 중첩도를 달성하며, 자료처리시 신중한 초동선택 등이 필요하다.

7. 결 론

경주시 감산사단층 부근에서 기록한 188 m의 굴절파 조사자료를 토모그래피 방법으로 분석한 결과,

1. 평균속도 350 m/s, 600 m/s, 1100 m/s의 3개 층이 2400 m/s 이상의 속도를 갖는 기반암 위에 분포함을 밝혔고,

2. 이층들을 각각 매립층, 표토층, 제4기층, 기반암층으로 해석하였다.

3. 또한 기반암은 북북서쪽으로 갈수록 깊어지고, 남남동쪽으로 얕아지는 분포 특성을 구명하였으며,

4. 원점에서 40 m 부근의 역단층과 북북서쪽으로 깊어지는 기반암 분포가 단층파쇄대의 존재와 연관이 있을 가능성을 제시하였다.

사 사

이 연구는 강원대학교 자원개발연구소의 지원으로 이루어졌음을 밝히며, 현장조사 및 측량 등에 수고하여 준 김우혁, 이소영 석사와 강원대학교 윤성수, 임경학 학생에게 감사를 표합니다.

참고문헌

김기영, 이소영, 김우혁, 김동훈, 2001, 고해상도 탄성파 반사법을 이용한 경주시 감산사 부근의 제4기 단층 지하구조 영상 연구, 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 134.

김인수, 손문, 정현정, 이준동, 김정진, 백인성, 1998, 경주-울산 일원에 대한 지역지질 특성 연구: 울산단층 주변 화강암류의 잔류자기와 대자율, 대한자원환경지질학회지, 31, 1, 31-43.

류충렬, 최위찬, 최성자, 한국지질자원연구원 지질연구부, 손문, 2001, 울산단층대 동변인 경주시 외동읍 신계리와 활성리에서 새로이 알려진 제4기단층의 논의, 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 2.

손문, 정혜윤, 김승현, 김인수, 문태현, 장태우, 1999,

한반도 동남부 신생대 지각변형과 연일 구조선, 제54차 대한지질학회 학술발표회 초록집, 대한지질학회, 50.

유영준, 유인걸, 송무영, 2001, 지하구조 해석을 위한 탄성파 굴절법 토모그래피 탐사 사례연구, 대한지질공학회지, 11, 2, 163-174.

장태우, 2001, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 지구조 운동, 지질학회지, 37, 431-444.

한국지질자원연구원, 2000, 감포지역 인터넷 지질도 (1:50,000).

Aki, K. and Richard, P.G., 1980, Quantitative Seismology, Theory and Methods, v. 2, W.H. Freeman and Co., New York.

Deans, S.R., 1983, The Radon transform and some of its application, John Wiley and Sons.

Ditmar, P., Penopp, J. P., Kasig, R. and Makris, J., 1999, Interpretation of shallow refraction seismic data by reflection/refraction tomography, Geophys. Prosp., Eur. Assn. Geosci. Eng., 47, 871-902.

Docherty, P., 1992, Solving for the thickness and velocity of the weathering layer using 2-D refraction tomography, Geophysics, Soc. of Expl. Geophys., 57, 1307-1318.

Hampson, D. and Russell, B., 1984, First-break interpretation using generalized linear inversion, I. Can. Soc. Expl. Geophys., 20, 40-54.

Hayashi, K. and Takahashi, T., 2001, High resolution seismic refraction method using surface and borehole data for site characterization of rock, Internat. Jour. Rock Mechanics & Mining Sciences, 38, 807-813.

Lanz, E., Maurer, H., and Green, A. G., 1998, Refraction tomography over a buried waste disposal site, Geophysics, Soc. of Expl. Geophys., 63, 1414-1433.

Moser, T.J., 1989, Efficient seismic ray tracing using graph theory. 59th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1106-1108.

OYO Corp., 2000, SeisImager/2D.

Palmer, D., 1980, The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation, Society of Exploration Geophysics, Tulsa.

Radon, J., 1917, Über die Bestimmung von Functionen durch ihre integralwerte langs gewisser Manningfaltigkeitin, Bu. Succhass. Akad. Leipzig., Math. Phys. K., 69, 262.

Saito, H., 2001, Seismic traveltime tomography for shallow subsurface explorations. Ph. D. Thesis, Hokkaido University.

Um, J. and Thurber, C., 1987, A fast algorithm for two-point seismic ray tracing, Bull. Seism. Soc. Am., 77, 972-986.

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

2002년 1월 21일 원고접수
2002년 3월 25일 원고채택