

기반암 깊이 도출을 위한 굴절법 탄성파 자료 분석: 사례연구

이두성^{1*}

¹한성대학교 정보시스템공학과

Seismic Refraction Analysis to Estimate the Depth to the Bedrock: Case Study

Doo Sung Lee^{1*}

¹Information System Engineering, Hansung University

요약 : 기반암 심도측정을 위한 탄성파 굴절법 탐사자료 분석 결과 다음과 같은 사실을 확인 하였다. 1) 매질의 탄성파 속도는 표토층(<4 m)에서는 250 m/s, 충적층(4 < < 17 m)은 2,500 m/s, 암반은 3,000 m/s 이상이다, 2) 탄성파 탐사에서 표출된 최하부 굴절면의 심도는 최대 17 m 정도로서 이는 3) 속도 및 밀도 검층 자료에서도 동일하게 심도 17 m 부근에서 속도 및 밀도의 증가가 관측된다. 반면 시추조사에 의하면 25 m 이하에서 암반(화강암)이 나타나며 결과적으로 굴절법 탄성파 탐사 및 검층기록과 시추조사 결과에서의 기반암 깊이가 서로 일치하지 않는다. 이러한 원인은 본 조사지역이 충적층의 속도가 상당히 커서 본 탐사기록의 송신원-수진점 거리(70~80 m)는 심도 25 m의 기반암 굴절파를 초동으로 기록하기 위해서는 충분하지 못한 것으로 분석하였다.

주요어 : 탄성파 굴절법, 기반암, 오프셋

Abstract : A seismic refraction study in estimation of depth to the bedrock demonstrates that 1) the average velocity in the medium is about 250 m/s in the surface layer (<4 m), 2,500 m/s in the weathered formation, and greater than 3,000 m/s in the bedrock, 2) the depth to the deepest reflector assumed to be the bedrock is about 17 m; however, according to the cores collected in a borehole in study area, the bedrock (granite) occurred at depth 25 m, 3) according to the density and velocity logging, at depth 17 m, a measurable velocity and density increase are observed, and 4) the velocity of the weathered formation is relatively high and therefore, the acquisition offsets (70~80 m) are turned out not to be long enough to record the refracted signal from the bedrock at depth 25 m as first arrivals.

Keywords : Seismic refraction, Bedrock, Offset

서론

암반의 심도를 규명하는 일은 도로, 터널, 교각 건설을 위한 지반조사의 중요한 과제 중 하나이다. 지반조사 목적으로 국내에서 주로 사용되는 탐사법은 탄성파굴절법, 전기비저항법, 시추탐사 및 시추공 토모그래피법 등이 있으며 이 중 기반암 심도에 대한 정량적인 정보를 제공하는 가장 보편적인 탐사법은 탄성파 굴절법이라 할 수 있다. 굴절법 탐사자료를 분석하는 방법은 일반적으로 초동의 주시곡선으로부터 각 지층의 구간별 속도와 층의 두께를 도출하는 전통적인 방법과 초동을 사용하여 파선추적에 의한 토모그래피법이 있다. 파선토모그래피법은 파선추적에 의하여 조사영역의 속도분포를 대수적으

로 재구성하는 방법이다.

본 논문에서 사용한 데이터는 포천 지역에서 획득한 굴절법 탄성파자료이다. 이 조사지역에서는 지하수 기초조사를 목적으로 물리탐사를 비롯한 다양한 지질공학적인, 수리지질학적 조사를 수행하였다. 조사방법은 탄성파 탐사(이두성 등, 2005), 전기비저항 탐사(유영준 등, 2005) 와 속도, 밀도, 전기비저항, 공경, 자연감마 등 다양한 물리검층(유영철 등, 2005), 유황·유속 측정, 수압시험, 양수시험 그리고 암추 검층(core logging) 및 실내 물성시험 등 이다(유영준 등, 2005).

이두성 등(2005)의 보고에 의하면 탄성파에 굴절법 자료분석 결과 최하부 굴절면의 심도와 시추에 의하여 확인된 기반암 심도가 일치하지 않았다. 본 연구에서는 탄성파 자료해석 결과와 시추조사 결과가 일치하지 않는 원인을 규명하고자 하였다. 즉, 탄성파 탐사에 의한 기반암 심도 추정 결과가 시추조사 결과 확인된 실제 기반암의 심도와 차이 여부를 재확인하고, 차이가 있다면 그 원인에 대한 합리적인 추론을 도출하는 것이 본 논문의 주제이다. 이를 위해 차이의 원인이 일차적

2005년 8월 1일 접수; 2005년 10월 19일 채택

*Corresponding author

E-mail: dslee@hansung.ac.kr

Address: Information System Engineering,

Hansung University, 389 Samseon-dong, 3-ga,

Seongbuk-gu, Seoul, 136-792 Korea

으로 탄성과 자료처리 과정에서 기인한 오류인지의 여부를 확인하고자 초동 피킹을 포함한 자료 재처리를 수행 하였다. 동시에 탄성과 탐사 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 속도 및 밀도 검증 자료를 대비, 고찰하였다. 최종적으로 시추코아 결과와의 대비함으로써 차이가 발생한 원인을 합리적으로 추론하고자 하였다. 본 논문에서 사용한 시추코아 분석결과는 대한광업진흥공사(2004)에 그리고 시추공 검증분석 결과는 유영철 등(2005)에 보고된 바 있다.

GRM 법에 의한 자료처리

GRM (Generalized Reciprocal Method; Palmer, 1981) 법은 탐사구간에서 한 쌍의 왕복주시곡선을 사용하여 매질의 층서 구조를 도출하는 방법이다 분석자료는 16개의 48-채널 송신원 기록으로 송신원 간격 10 m 수신원 간격 2 m이다. 모든 기록은 초동을 인식하기에 충분할 정도로 신호/잡음 비가 양호한 상태이다(Fig. 1). 모든 기록의 초동을 주시곡선으로 표시하면 Fig. 2와 같다.

송신원 정보정(Source static correction)

Fig. 2에서 원과 굵은 선으로 나타낸 기록은 GRM을 적용할 송신원 0과 송신원 90 그리고 인접한 기록이다. 송신원 0 과 송신원 90의 주시곡선을 비교하면, 송신원 0에서 발생한 신호가 측정 90에 수신된 초동(T_{AB})은 65 ms 이고 송신원 90에서 발생한 신호가 측정 0에 수신된 초동(T_{BA})은 67 ms 이다. 이러한 왕복주시의 차이는 자료의 오류라 생각되며 GRM 법으로 자료 분석을 하려면 이러한 주시차(travel-time difference)는 보정 되어야한다.

본 연구에서는 이러한 주시차의 원인으로 송신원 스테틱(static)을 생각하였다. 송신원 스테틱의 원인은 지형적인 요소로서 송신점의 실제 위치와 기록상 위치의 상이함 또는 심한

표고차 등을 생각할 수 있으나 본 측선에는 측정할 만한 표고 차이가 없으므로 이러한 차이는 기계적인 요소로서 트리거 시간 제어(triggering time control) 문제로 생각하였다.

일반적으로 모든 탄성과 기록은 정도의 차이는 있으나 스테틱을 포함한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 두 기록의 역행주시와 인접한 기록을 참조하여 송신원 스테틱을 보정하였다. 송신원 90은 모든 측정에서 송신원 100과 송신원 80 기록 사이에 비교적 고르게 분포하는데 비하여 송신원 0의 경우 지나치게 송신원 10에 근접하거나 겹쳐서 분포한다. 따라서 본 논문에서는 송신원 0 기록에 문제가 있다고 판단하여 송신원 0 기록을 Fig. 3 과 같이 보정하였다. 보정된 주시곡선에서 T_{AB} 는 66 ms 으로 T_{BA} 에 근사하다. 여기서 보정은 송신원 0 기록 전체를 3 ms 상향조정 한 것이다.

그 외의 다른 기록들도 어느 정도 스테틱 문제가 있을 것이나 보정하지 않았다.

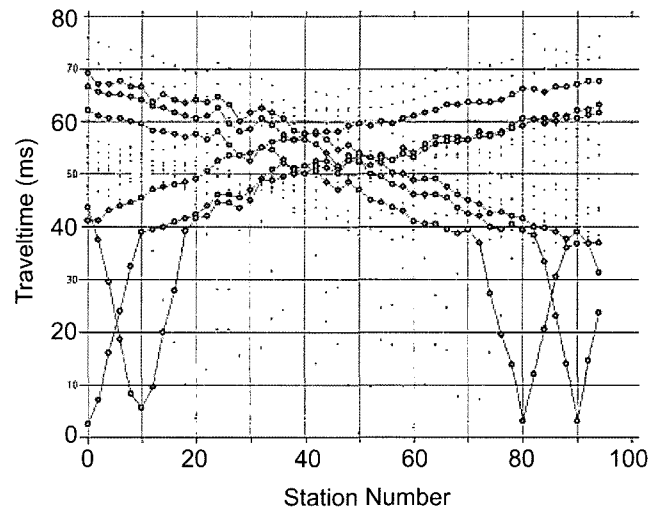


Fig. 2. Traveltime curves with highlighted 4 shot records; shots at -10, 0, 10, 80, 90, and 100.

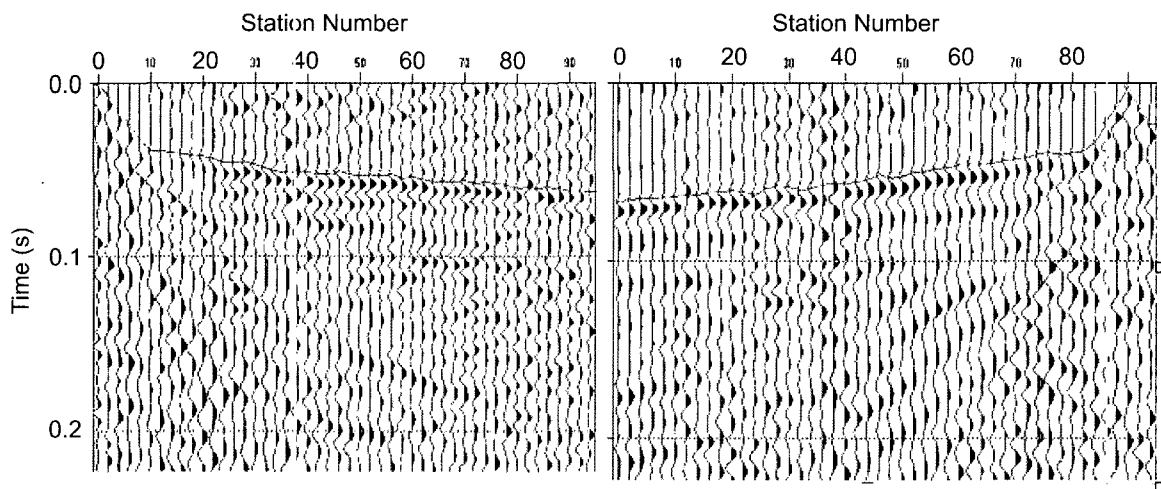


Fig. 1. Shot records; shot point at station 0 (left) and shot point at station 90 (right). First troughs are picked as the first arrivals.

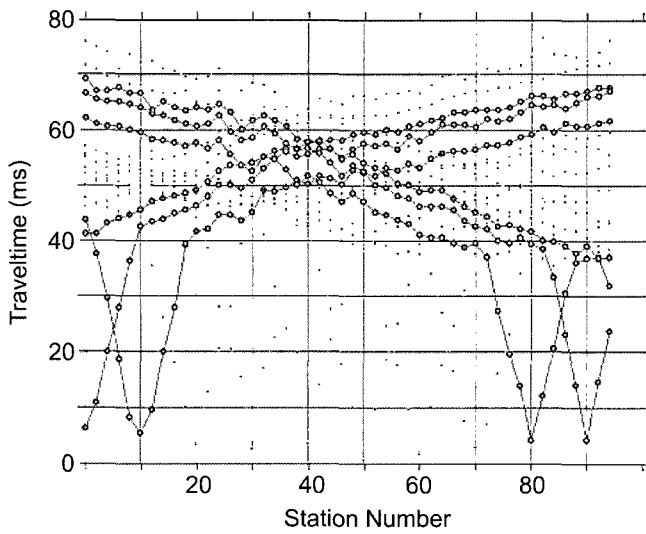


Fig. 3. Shot record 0 was adjusted to fit the record placed between shot -10 and shot 10.

GRM법에 의한 분석 결과는 전적으로 두 개 주시곡선에 관계함으로 두곡선의 주시는 인접한 기록들의 주시 패턴을 참조하여 세밀하게 보정하는 것이 중요하다.

팬터밍(Phantoming) 및 주시 보정

팬터밍은 모든 측정에서 동일한 굴절면에서 굴절된 신호를 도출하는 과정이다. 한 쌍의 왕복 주시 중 근거리 측정의 주시를 인접한 원거리 기록을 참조하여 보정하는 과정이다(Palmer, 1981). 송신원 0의 주시곡선에서 송신원에서 거리가 대략 35 m 이상인 구간의 속도는 3,500 m/s 이상으로 이 구간의 신호는 기반암에서 굴절된 신호로 볼 수 있으며, 35 m 이내의 근거리에서 측정된 신호는 상부 매질을 통하여 전달된 신호이다. 따라서 측점이 35 m 이내인 구간에서 기반암에서 굴절된 가상의 신호를 도출하기 위하여 원거리 송신원 기록을 참조하였다. 즉 송신원 0 기록의 근거리 주시는 송신원 -30 기록을 참조하였다. 두 개의 곡선에서 평행한 구간(측점 34~90)의 평균 주시차(ΔT)를 산출하여 측정 0~34 구간의 원거리 기록 주시에서 ΔT를 감하여 근거리 구간 주시로 작성하였다. 동일한 방법으로 송신원 90 기록은 측정 78~90 구간에서 송신원 120 기록을 참조하였다. 팬터밍한 구간은 그림에서 화살표로 표시하였다.

시간-속도분석(Time-Velocity analysis)

시간-속도 분석은 Palmer (1980)에서 제시된 식 (1)을 사용하였다.

$$t_v(G, XY) = (t_{AY} - t_{BX} + t_{AB})/2 \tag{1}$$

여기서 G는 속도분석을 실시할 측정으로 X와 Y의 중앙점이고, t_{AY} 와 t_{BX} 는 각각 송신원 A에서 측정 Y에 그리고 송신원

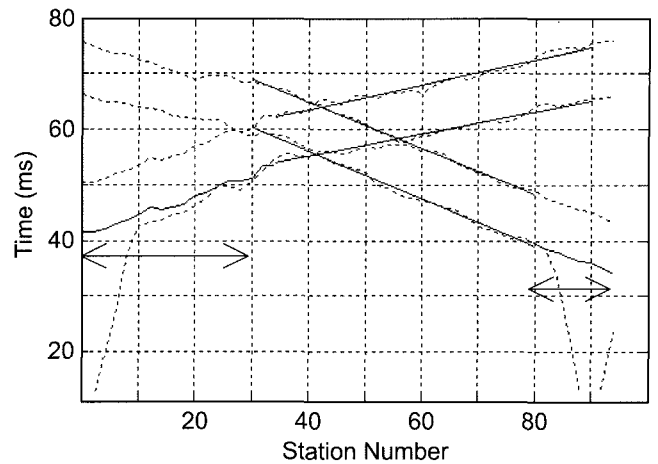


Fig. 4. Reciprocal traveltimes curves generated by phantoming process.

B에서 측정 X에 도달한 시간이며 t_{AB} 는 왕복주시이다. 여기서 AX와 BY가 겹치는 부분 즉 XY를 파라미터로 하여 최적의 굴절속도를 도출하게 된다. 본 연구에서는 오프셋 즉 XY가 0, 2, 4, 6 m의 경우의 시간-속도 분석을 수행하였다. 오프셋에 따른 시간-속도 곡선 중 가장 평탄한 곡선은 오프셋이 0인 경우로 나타나서 오프셋 0을 최적의 오프셋으로 선정하여 시간-속도 곡선을 도출하였다. 구간별 속도는 시간-속도 곡선에서 기울기가 비교적 일정한 3개 구간을 선택하여 곡선의 기울기를 선형회귀(Linear Regression)로 산출하여 도출하였다. 이 3개 구간의 구간별 속도는 측정 0~32 구간은 3,405 m/s, 34~72 구간은 3,175 m/s, 그리고 74~90 구간은 3,276 m/s이다.

시간-심도 분석(Time-Depth analysis)

시간 심도 분석은 식 (2)를 사용하였다.

$$t_d(G, XY) = [t_{AY} - t_{BX} - t_{AB} - XY/V_3(G)]/2 \tag{2}$$

여기서 $V_3(G)$ 는 시간-속도 분석에서 도출한 측정 G에서 굴절면의 속도이다.

GRM 분석에서 속도 및 굴절면의 심도도출의 최적 오프셋은 시간-속도곡선이 가장 평활하고 시간-심도 곡선이 가장 변화가 심한 경우이다. 오프셋 간격을 0, 2, 4, 6 m로 변화시키면서 구한 시간-심도 곡선 중 0 m 오프셋 곡선이 변화폭이 가장 크게 나타나며 이로부터 최적 오프셋을 0 m로 적용하였다.

심도보정(depth migration)

기록들의 주시곡선을 보면 조사지역은 속도 측면에서 3개 층으로 볼 수 있다. 1층은 표토층으로 속도가 대략 200 m/s, 제2층은 충적층으로 속도가 대략 2,000~2,500 m/s, 그리고 기반암속도는 위에서 서술한 바와 같이 3,000 m/s 이상이다.

1층 속도와 두께 그리고 제 2층의 속도는 각 송신원 기록의

주시곡선에서 intercept time 법으로 산출하였다. 첫 번째 굴절면의 심도 즉, 제 1층의 두께는 대략 4~5 m 이며 속도는 200~250 m/s 인데 비하여 제 2층의 속도는 대부분 2000~2500 m/s 이며 3000 m/s 이상인 기록도 있다. 속도가 3000 m/s 이상인 구간은 기반암의 속도와 비슷한 것으로 해석할 수 있다.

측점 G에서 제 2층의 두께 $z_2(G)$ 는 최적 시간-심도 t_g 로부터 식 (3)을 사용하여 산출하였다.

$$t_g(G) = z_1(G)\sqrt{v_3^2 - v_1^2}/v_1v_3 + z_2(G)\sqrt{v_3^2 - v_2^2}/v_2v_3 \quad (3)$$

심도 보정에서 사용한 각 층의 구간별 속도는 Fig. 5에 표시된 바와 같다. 결과 단면에서 보면 기반암의 심도는 11~17 m 로 표시되고 있다. 그러나 시추주상도에 의하면 조사지역의 기반암 출현심도는 24 m로 확인된다. 이는 곧 GRM에 의해 도출한 제 2 굴절면은 기반암 경계보다는 상부의 충적층 임피던스 경계면을 따라 임계 굴절되었음을 암시하며 실제로 Fig. 7의 밀도 및 Suspension PS 검층 기록을 살펴보면 심도 17 m 부근에 밀도 및 구간속도의 급격한 변화 구간을 인지할 수 있다 (화살표 한 부분).

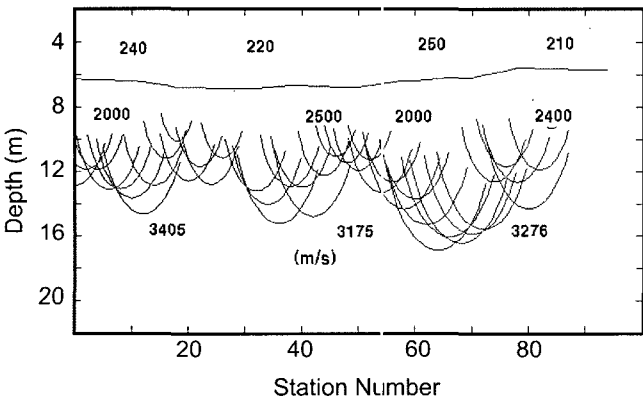


Fig. 5. Interpreted velocity cross-section of the medium generated by the GRM method.

굴절법 토모그래피

굴절법 토모그래피는 유한차분법을 이용한 파선추적(Qin *et al.*, 1989)에 의한 반복 역산법을 사용하였다(고광범과 이두성, 2002). 초기 속도모델은 GRM 법의 결과와 시추 주상도를 참조하여 2가지 속도모델을 이용하였다. GRM의 결과를 참조한 첫 번째 모델은 3층 수평구조로 제 1층(심도 5 m) 속도는 250 m/s, 제 2층(심도 16 m) 속도는 2500 m/s, 그리고 기반암속도는 4000 m/s 로 설정하였고 시추 주상도를 참조한 두 번째 모델은 제 2층의 심도만을 25 m로 변화를 준 모델이다. 두 속도모델을 이용하여 50회 반복 역산을 거쳐 재구성한 토모그램 중 GRM에 기초한 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 역산 결과 토모그램은 초기 속도모델과 거의 흡사하며 GRM 결과에 비하

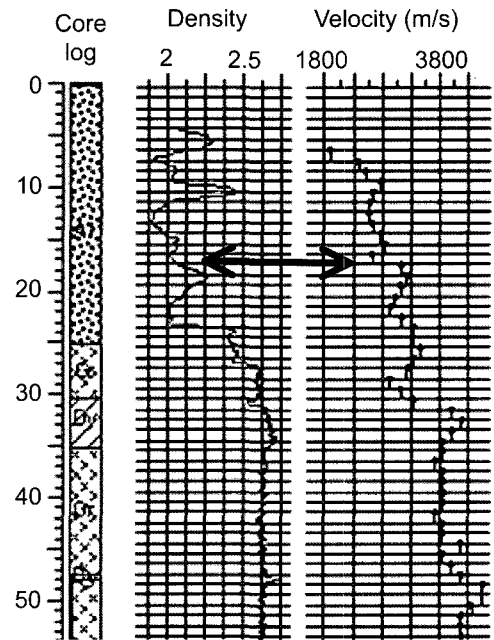


Fig. 7. Core-density-velocity logs (after Yu *et al.*, 2005).

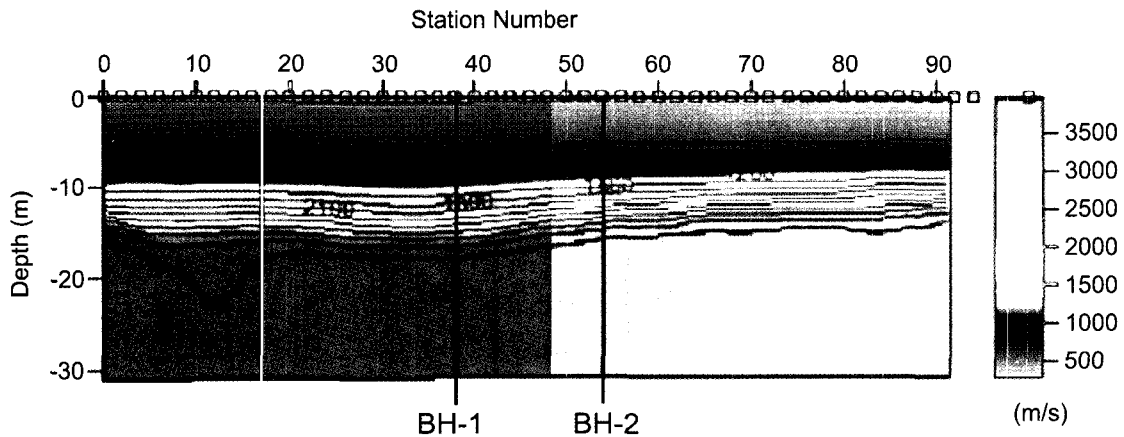


Fig. 6. Velocity tomogram generated by using a 3-layer initial velocity model.

여 기반암깊이의 수평적 변화는 거의 없으며 심도는 대략 15 m 이다.

한편 토모그램은 횡방향 속도분포가 GRM 결과에 비해 기반암 심도의 수평적 변화가 거의 없는 층서구조 형태를 보인다. 즉, 토모그래피에 의한 매질의 속도분포는 수평적으로 매우 평활한데 비하여 GRM법 결과는 심도의 변화 폭이 최대 6 m의 변화가 있다. 이러한 차이는 GRM 법이 단지 2개 기록의 주시를 사용하므로 국부적인 주시의 변화가 그대로 그 지점의 심도 산출에 영향을 미치는데 비하여 토모그래피는 다수의 기록이 사용되며 매 단계의 역산과정에 포함된 속도 평활화에 기인한 것으로 판단된다.

자료 비교검토 및 결론

BH-1호공(측점 38 m 지점)에서 채취한 시추 결과에 의하면 기반암인 화강암은 심도 25 m에서 확인되며 이는 GRM과 파선토모그래피 법에 의한 해석 결과와 상당히 다른 결과이다. 즉, GRM과 파선 토모그래피 기법을 이용한 탄성과 굴절법 결과와, 유영철 등(2005)의한 검층, 코어분석 등의 결과와 비교하여 다음과 같은 사실을 관찰할 수 있었다.

1. GRM 및 파선토모그래피 법에 의한 제 2 굴절면 출현 심도는 상호 유사하게 심도 약 15 m 전후에서 임계 굴절된 것으로 판단되며 이는 밀도 및 Suspension PS 검층결과(17 m 지점의 밀도 및 임피던스 변화)와도 일치한다. 반면 직접자료인 시추주상도에서는 이 심도에서 뚜렷한 암질의 변화는 확인되지 못하였다.

2. 코어분석에 의하면 25 m 까지는 층적층이고 깊이 25 m 에 화강암이 나타나는 것으로 보고되었는데(Fig. 7). 굴절법 탐사자료의 최하부 굴절면(deepest refraction event)의 심도는 대략 17 m이다. 유영철 등(2005)에 발표된 물리검층자료에 의하면 17 m 부근의 매질에 측정할만한 수준의 속도변화(2800에서 3300 m/s)가 있고 그 부근에서 밀도의 증가도 관찰할 수 있다. 따라서 GRM과 파선 토모그래피 법에 의한 제 2 굴절면은 이 경계면에서 임계 굴절된, 최하부 굴절면으로 측정된 것으로 판단되며 시추 주상도는 이 구간을 하나의 층(층적층)으로 판단하였는 바, 이는 시추방식이 회전수세식에 의해 굴진함으로써 파악이 어려웠을 경우로 생각된다.

3. 천부 (<20 m) 구간 매질의 제 2 굴절면의 심도별 변화 폭은 GRM에 의한 기반암 심도는 11~17 m 로 수평적으로 6 m 정도 변화를 보이고 있으나 토모그램에서는 심도변화가 1 m 내외로 비교적 평활한 속도구조를 보이고 있다. 이는 파선 토모그래피의 매 반복단계에서의 속도 평활화 연산에 기인한 것으로 판단된다.

4. 탄성과 굴절법 분석결과에 나타난 층적층의 속도는 2000 m/s 이상으로 일반적으로 다른 지역의 층적층 속도 보다 상당

히 높는데 이러한 사실은 속도검층 자료에서도 확인된다.

5. 측정된 최하부 굴절면이 시추자료에서 확인된 기반암 경계에서의 임계 굴절면이 아닌 이유로서 충분하지 못한 탐사 오프셋을 생각할 수 있다. 두 개의 시추공이 있는 구간 측정 38~54 구간에서 원거리 송신원 기록의 오프셋은 70~80 m 이며, 이 구간에서 GRM을 적용한 기록 송신원 0 과 90 의 주시곡선은 해당하는 원거리 오프셋의 주시곡선들과 평행하다. 일반적으로 25 m 심도의 기반암 탐사에서 이러한 오프셋 구성은 충분하다고 생각할 수 있다. 그러나 본 지역의 특이한 속도구조, 즉 상당히 높은 속도의 제 2층 분포 때문에 기반암 경계면의 굴절파를 획득하기 위해서 상당히 긴 오프셋 기록이 요구된다.

제 3층 상부에서 굴절된 신호를 초동으로 측정하기위한 최소 오프셋은 3층 구조의 주시곡선 식으로부터 산출할 수 있다. 3층 구조 모델에서 2층의 상부에 굴절된 주시곡선을 $t_2(x)$, 3층의 상부에서 굴절된 주시곡선을 $t_3(x)$ 라 하면,

$$t_2(x) = \frac{2h_1(1 - (v_1/v_2)^2)^{1/2}}{v_1} + \frac{x}{v_2} \quad (4)$$

$$t_3(x) = \frac{2h_1(1 - (v_1/v_3)^2)^{1/2}}{v_1} + \frac{2h_2(1 - (v_2/v_3)^2)^{1/2}}{v_2} + \frac{x}{v_3} \quad (5)$$

이다. 여기서 h_1 과 h_2 는 1층과 2층의 두께이고 v_1, v_2, v_3 는 각층의 속도이다.

기반암 즉 제 3층 상부에서 굴절된 파동을 초동으로 획득하려면 $t_3(x) < t_2(x)$ 가 되는 오프셋을 확보해야한다. 예를 들어 각층의 속도가 250 m/s, 2500 m/s, 그리고 3500 m/s 이고 1층과 2층의 두께가 각각 5 m와 20 m의 3층 구조인 경우 제 3층의 굴절파를 초동으로 획득하기위한 최소 오프셋은 99 m 정도이다.

따라서 기반암 심도를 파악하기위한 탄성과 굴절법 자료 획득 시 유의할 사항은 지질 조건에 따라 충분한 오프셋을 확보하지 못할 경우 탄성과 최하부 굴절면이 기반암의 경계면과 일치하지 않을 수 있다는 사실을 유의해야 할 것이다.

사 사

본 논문을 작성하는데 기술적인 도움과 참고자료를 제공해 준 대한광업진흥공사 유영준, 지오맥스의 고광범 박사 와 동아 컨설턴트의 유영철 씨에게 감사한다. 이 연구는 2005년도 한성대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

고광범, 이두성, 2002, 탄성과 굴절법 파선토모그래피에 의한 지반침하 해석, 한국자원공학회지, 39, 283-288.
 대한광업진흥공사, 2004, 포천지역 지하수 기초조사보고서.

P538.

- 유영준, 김종남, 유인걸, 2005, 포천지역 지하수 기초조사 산학연 공동탐사 사례연구(3): 전기탐사기술, 2005년 한국물리탐사학회 대한지구물리학회 공동 학술대회 논문집, 129-136.
- 유영철, 이상태, 유영준, 황세호, 신제현, 2005, 포천지역 지하수 기초조사 산학연 공동탐사 사례연구(1): 공내탐사기술, 2005년 한국물리탐사학회 대한지구물리학회 공동 학술대회 논문집, 117-122.
- 이두성, 유영준, 유영철, 2005, 포천지역 지하수 기초조사 산학연 공동탐사 사례연구(2): 탄성과 탐사기술, 2005년 한국물리탐사학회 대한지구물리학회 공동 학술대회 논문집, 123-127.
- Palmer, D., 1980, *The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation*, Soc. Expl. Geophys.
- Palmer, D., 1981, An introduction to the generalized reciprocal method of seismic interpretation, *Geophysics*, **46**, 1508-1518.
- Qin, F., Olsen, K. B., Cai, W., and Schuster, G. T., 1989, Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts, *Geophysics*, **57**, 478-487.