자원환경지질, 제43권, 제6호, 615-623, 2010
Econ. Environ. Geol., 43(6), 615-623, 2010

굴절법 탄성파탐사 현장에서 GRM을 이용한 청주화강암지역 기반암 깊이의 신속한 추정

이선중[1] · 김지수[1]* · 이철희[2] · 문윤섭[3]
[1]충북대학교 지구환경과학과, [2]아시아지오 컨설턴트(주), [3]지오맥스(주)

Fast Delineation of the Depth to Bedrock using the GRM during the Seismic Refaction Survey in Cheongju Granite Area

Sun-Joong Lee[1], Ji-Soo Kim[1]*, Cheol-Hee Lee[2] and Yoon-Sup Moon[3]
[1]Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Korea
[2]ASIAGEO Consultants Co.,Ltd
[3]GEOMAX Co.,Ltd

Seismic refraction survey is a geophysical method that delineates subsurface velocity structure using direct wave and critically refracted wave. The generalized reciprocal method(GRM) is an inversion technique which uses travel-time data from several forward and reverse shots and which can provide the geometry of irregular inclined refractors and structures underlain by hidden layer such as low velocity zone and thin layer. In this study, a simple Excel-GRM routine was tested for fast mapping of the interface between weathering layer and bedrock during the survey, with employing a pair of forward and reverse shots. This routine was proved to control the maximum dip of approximately 30° and maximum velocity contrast of 0.6, based on the panel tests in terms of dipping angle and velocity contrast for the two-layer inclined models. In contrast with conventional operation of five to seven shots with sufficient offset distance and indoor data analysis thereafter, this routine was performed in the field shortly after data acquisition. Depth to the bedrock provided by Excel-GRM, during the field survey for Cheongju granite area, correlates well with the elevation of the surface of soft rock from the drill core and SPS logging data. This cost-effective routine developed for quickly delineating the bedrock surface in the field survey will be readily applicable to mapping of weathering zone in narrow zone with small variation of elevation of bedrock.

Key words : bedrock, seismic refraction survey, generalized reciprocal method, SPS logging

굴절법 탄성파탐사는 직접파와 임계굴절파를 이용하여 지하의 속도구조를 파악하는 지구물리탐사방법이다. GRM은 해석기법 중의 하나로서 수개의 정방향 및 역방향 발파의 주행시간을 이용하여 경사면은 물론 저속도층이나 얇은 층과 같은 숨은 층 하부에 대한 정보까지 제공한다. 이 연구에서는 5~7점 발파가 수행된 후 실내 자료처리 작업이 진행되는 일반적인 조사와 달리, 신축부지의 터파기 과정 및 시추자료에서 해석된 풍화대/기반암의 2층 구조를 대상으로 현장에서 간단히 양단발파 자료만을 가지고 엑셀 기반의 GRM을 적용시켜 풍화대와 기반암의 경계면을 신속히 파악할 수 있는지 살펴보았다. 이 방법의 적용효과와 계산의 신뢰도를 확인하기 위해 경사각과 속도대비 변화에 따른 각 모형에 대한 적용성을 검토한 결과 각각 최대 약 30°의 경사와 최대 0.6의 속도대비가 되는 경계면을 해석할 수 있는 것으로 나타났다. 청주화강암체에 대한 실제 현장탐사에서 해석된 기반암까지의 깊이는 시추자료 및 SPS 검층자료에서 도출된 연암 상부의 표면과 잘 상관되었다. 실제 현장에서 기반암까지의 깊이를 간편한 엑셀-GRM을 이용하여 신속히 추정할 수 있다는 점에서 기반암의 깊이가 심하게 변하지 않은 좁은 지역에서의 풍화대 조사 및 이에 따른 저비용의 탐사설계에 일정한 역할을 할 것으로 보인다.

주요어 : 기반암, 굴절법 탄성파탐사, GRM, SPS 검층

*Corresponding author: geop22@cbnu.ac.kr

1. 서 론

탄성파 굴절법 탐사는 속도가 다른 지하경계면에서 임계굴절하는 선두파를 기록하고 분석하여 지하의 속도 구조를 알아내는 탐사법이다.

굴절법 탐사에서는 주로 P파의 초동을 판독하고 해석하는 것이 일반적이고 그 측정방법에는 여러 가지가 있다. 일반적으로 지층의 속도가 수평적으로 변하거나 지층경계면이 평탄하지 않고 복잡한 경우에는 지연시간(Delay-time)법(Hagedoorn, 1959), 파면(wavefront)법, 파선추적(raytracing)법, 일반 역방향 전파시간법(GRM: generalized reciprocal method), 일반화된 선형 역산(GLI: generalized linear inversion) 등이 많이 이용되고 있으며(Burger, 1992), 국내에서도 지하매질을 여러 개의 셀로 나눈 후 반복적으로 수치모형 반응계산을 수행하여 측정 자료와의 오차가 작은 탄성파 속도 구조를 찾는 굴절법 토모그래피법이 많이 시도되고 있다(Cho *et al.*, 2002).

토모그래피법에서 속도가 상대적으로 작은 층은 페르마의 원리에 따라 파선 밀도가 현저히 낮아 정확한 구조를 얻기 힘들다(Berryman, 1989). 반면 GRM은 토모그래피법에 비해 그 해상도는 낮지만 숨은 층, 즉 저속도층이나 얇은 층의 하부에 대한 정보를 얻을 수 있다는 데 그 장점이 있다(Lankston., 1990).

이 논문에서는 굴절법탐사 자료처리기법의 하나인 GRM의 이론 및 수치모형 자료를 통해 탄성파굴절법 자료처리의 특성을 비교·분석하고자 하였다. 이 연구의 초점은 무엇보다도 현장에서 2개만의 양단발파점 자료를 활용하여 청주화강암 부지의 터파기 및 시추과정에서 확인된 풍화암/기반암의 2층 구조에 대한 기반암까지의 깊이를 신속하고 간단히 파악하는 데 있다.

이론자료 수집은 OMNI 모델링 프로그램을 이용하였고(OMNI 3D), 수치모형의 GRM 자료해석은 엑셀을 이용하였다. 각 모형은 경사 2층 구조의 경사와 속도를 변화시켜 설정하였으며 입력변수는 기반암 상부까지의 깊이, 풍화대와 기반암의 속도, 지오폰 간격, 지오폰의 수 등이다. 모델링을 통해 각 층의 깊이 등을 포함한 지하구조를 결정하고 그 결과를 입력 모형의 그것들과 비교해 보았다.

모형자료에 활용된 간단한 프로그램의 타당성을 보이기 위해 약 30 m 거리에 있는 깊이 50 m의 2개 시추공 부근에서 120 m 길이의 측선에 대한 탄성파 굴절법 양단발파 자료를 얻고 이에 대한 현장에서의 엑셀-GRM 해석자료를 시추 및 SPS 검층자료와 비교해 보았다.

2. GRM 이론

GRM은 일반화시킨 굴절법 탄성파탐사 자료해석 방법으로서 정방향과 역방향 발파로부터 얻어진 주시자료를 이용하여 지하 굴절층의 기하학적인 구조를 그래프 해로 규명하는 역산기법이다(Palmer, 1980, 1981). 이것은 일종의 구조보정을 이용하여 굴절층의 상세한 구조와 그 안에 있는 수평 변화를 보이는 모든 불연속체에 대한 정보를 얻는 방법으로 굴절면의 임계굴절점(Fig. 1의 P, Q 지점)과 파의 지표 출현점 사이의 수평오프셋 거리를 사용한다(Fig. 1의 XY 사이의 거리).

지연시간법을 기반으로 Palmer가 제안한 속도 분석함수 t_V와 XY의 중간점 G에서의 시간-깊이 함수 t_G는 각각 다음과 같다.

$$t_V=\frac{1}{2}(t_{AY}-t_{BX}+t_{AB}) \tag{1}$$

$$t_G=\frac{1}{2}\left[t_{AY}+t_{BX}-\left(t_{AB}+\frac{XY}{V_2}\right)\right] \tag{2}$$

최적의 오프셋 거리에서 P와 Q는 일치하게 되는데, 이때 불규칙한 굴절면의 적절한 속도 값을 구할 수 있게 된다. 이 때 XY의 거리를 "최적 오프셋 XY값"이라고 칭하고 그 값에 대한 속도 분석 함수의 기울기가 굴절층 속도 V_2의 역수가 된다(Palmer, 1986).

V_2를 결정한 다음 중간점 G, 즉 지오폰 하부의 심도 Z_G를 결정하기 위해서 시간-깊이 함수를 계산해야 한다. 속도분석 함수와 마찬가지로 "최적 오프셋 XY값"에서 P와 Q는 일치하게 되고 가장 적절한 굴절층의 심도를 나타내는 시간-깊이 함수 값을 얻게 된다. 속도분석 함수 t_V에서 t_{AB}을 더하여 준 이유는 사실상 음수로 표현되지 않게 하기 위함이기에 더하여 주지 않아도 굴절층의 속도에는 아무런 영향을 주지 않는다

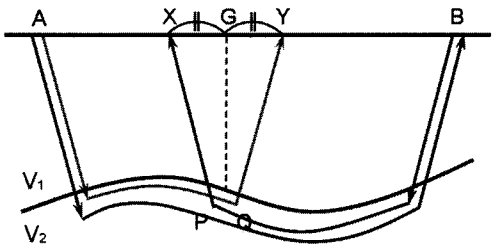

Fig. 1. Schematic summary of parameters used in the GRM. The position G is at the mid-point between the points of emergence at the surface of forward and reverse at Y and X, respectively. V_1 and V_2 are the velocity of the upper and lower layer, respectively.

(Kim, 1991).

깊이 Z_G에 관련된 식은 다음과 같다.

$$t_G=Z_G\frac{\sqrt{V_2^2-V_1^2}}{V_1V_2} \tag{3}$$

Fig. 1에서 점 P와 점 Q가 일치했다고 가정했을 때 XY의 거리와 깊이에 대하여 식을 표현할 수 있다. 이렇게 계산한 XY값을 "계산된 XY값"이라고 하고 다음과 같이 표현한다.

$$XY=2\sum Z_G\tan\theta_c \tag{4}$$

GRM을 이용한 해석방법은 이러한 "계산된 XY값"과 "관측된 XY(XY_{opt})값"의 비교로 이루어진다. 만약 일치하지 않는 경우에는 굴절층의 상부에 숨은 층이 존재한다고 가정을 하고 속도에 대한 보정을 해주어야 한다. 숨은 층에 대한 보정된 속도 V'은 다음과 같으며,

$$V'=\sqrt{\frac{V_2^2XY_{opt}}{XY_{opt}+2t_GV_2}} \tag{5}$$

다시 계산된 깊이는

$$Z_G=t_G\frac{V_2V'}{\sqrt{V_2-V'}} \tag{6}$$

으로 나타낼 수 있다. 이와 같이 GRM은 굴절면이 불규칙하거나, 숨은 층이 존재하는 경우에도 굴절면의 깊이를 비교적 정확하게 계산할 수 있다.

3. 프로그램의 적용성 검토

3.1. 경사구조의 모형자료 분석

1층의 속도 2000 m/s, 2층의 속도 5000 m/s, 심도 5~15 m, 경사각 25°로 주어진 경사구조(Fig. 2)에 대해 수신점은 5 m에서 115 m까지 5 m 간격으로 23개 설정하였으며 발파는 양끝 원거리 5 m 지점(0 m, +120 m)에서 각각 실시하였다. 여기서 주시곡선은 굴절파만 표시되었다.

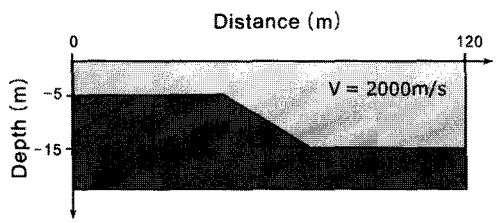

Fig. 2. Inclined layer. Source points are located at 0 m and 120 m.

양쪽 발파 기록의 초동을 발췌하여 얻은 주시곡선(Fig. 3)으로부터 계산된 속도분석 함수와 시간-깊이 함수는 각각 Fig. 4의 (a)와 (b)에 나타냈다. 여기서 XY는 0~40 m의 범위에서 5 m 간격으로 살펴보았다. 속

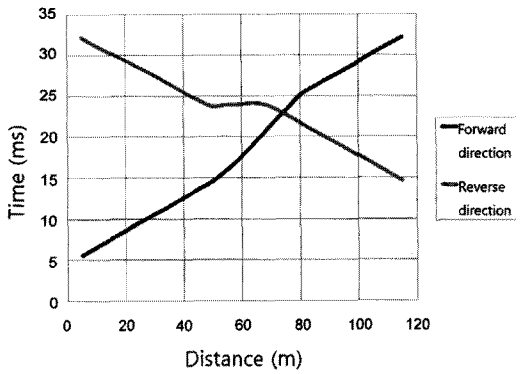

Fig. 3. Forward- and reverse-direction traveltime distance curves for the model in Fig. 2.

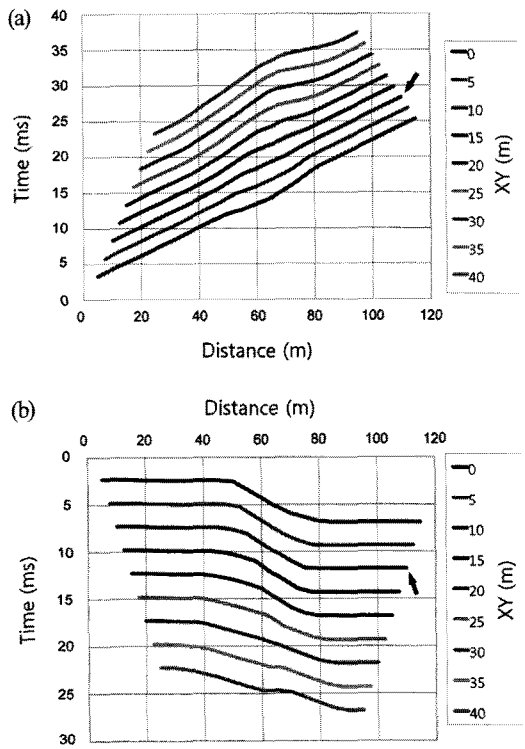

Fig. 4. (a) Velocity analysis curves and (b) time-depth curves for XY spacings from 0 to 40 m. The arrow represents the curve for XY=10 m.

도분석 함수(Fig. 4 (a))와 시간-깊이 함수(Fig. 4 (b))에서 "관측된 최적 $XY(XY_{opt})$값"은 각각 직선에 가장 가까운 경우(단순기준)와 가장 복잡한 경우(복잡기준)을 고려하여(Kim *et al.*, 2003) XY=10 m으로 결정하였다.

그러나 실제 경사면에서는 단순히 "관측된 XY(XY_{opt})값"이 정확하지 않을 수 있으므로 "최적 오프셋 XY값"에 대한 범위를 설정해 주어야 하는데 일반적으로 "관측된 XY(XY_{opt})값"을 기준으로 한개 간격의 범위를 설정한다(Kim, 1991). 따라서 XY=10 m를 기준으로 5~15 m로 범위가 정해지는데 이 범위는 앞서 식(4)에서 "계산된 XY값"인 XY=8.45 m를 포함한다는 점에서 두 가지 방법으로 평가된 XY는 서로 잘 부합하고 있다. 그러므로 "관측된 XY(XY_{opt})값"를 이용하여 식(1)의 속도분석 함수로 속도를 구하고 식(3)에서 각 지오폰 직하부의 깊이 Z_G를 연결하여 지하 굴절면을 재건한다(Fig. 5).

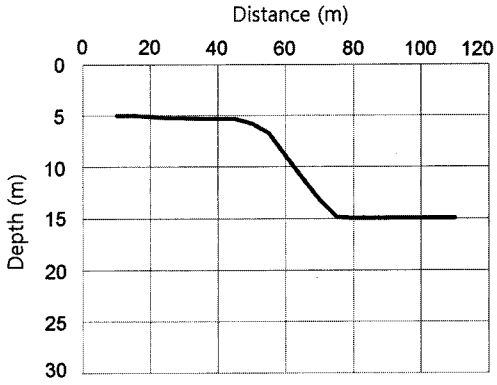

Fig. 5. GRM inversion result for the model in Fig. 2.

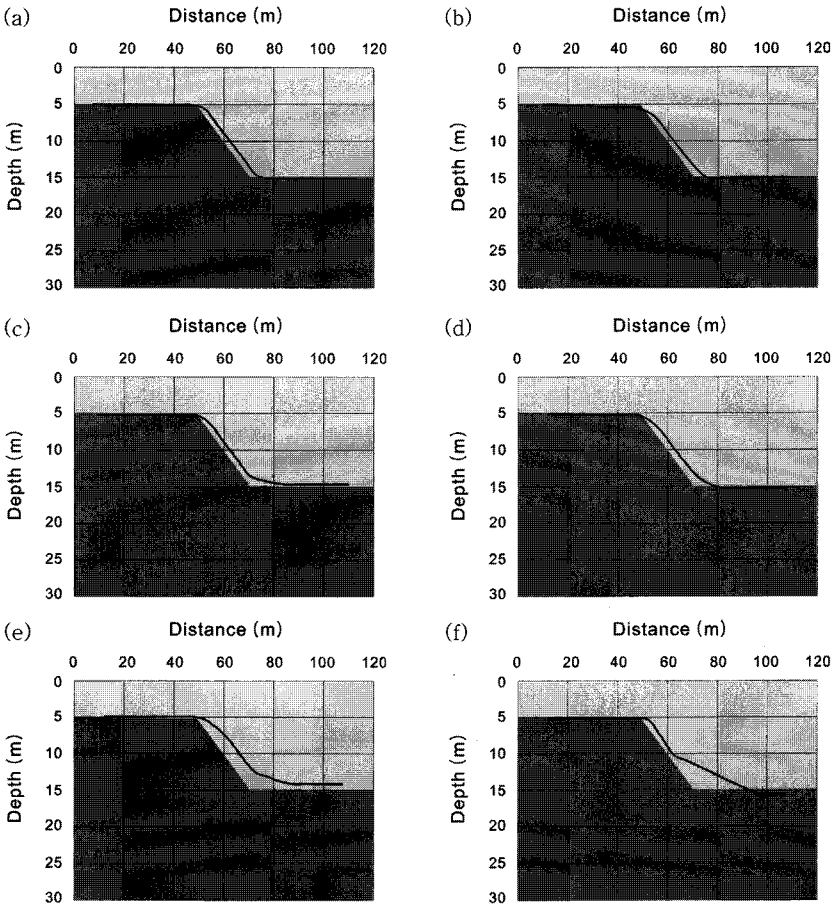

Fig. 6. Input model and GRM inversion results(solid line) for the velocity of the upper layer (a) 1000 m/s, (b) 2000 m/s, (c) 2500 m/s, (d) 3000 m/s, (e) 3500 m/s, and (f) 4000 m/s. The velocity of the lower layer is 5000 m/s.

3.2. 속도대비 변화에 따른 Mapping 효과

속도대비의 변화에 따른 적용성을 파악하기 위해 입력모형과 본 프로그램을 적용하여 작성한 단면도의 차이를 알아보았다.

하부층의 속도는 5000 m/s로 고정하고 상부층의 속도를 1000~4000 m/s 범위에서 변화를 주었다. 물론 동시에 두께의 변화까지 고려해야 의미가 있겠지만 부지에서 확인된 약 2 m의 얇은 표토층과 탐사 수행 시 설정한 5 m의 지오폰 간격을 고려하여 풍화암의 두께는 고정시키고 속도대비를 변화시켜 그 효과를 살펴보았다(Fig. 6). 상부층의 속도가 3000 m/s가 증가할 때, 즉 속도대비가 약 0.6이하이면 기반암의 굴절경계면은 비교적 정확히 찾아가고 있다. 더 나아가 속도대비가 증가할수록 주어진 두께에서 임계거리가 작아지므로 양단발파 자료만을 이용한 조사가 가능할 것으로 보인다.

3.3. 경사각 변화에 따른 Mapping 효과

상부층과 하부층의 속도가 각각 2000 m/s, 5000 m/s인 경우 지하구조의 경사각 변화에 따른 입력모형과 도출된 단면도의 차이를 살펴보자.

각 입력모형에 대하여 계산된 지하단면도(Fig. 7)를 관찰할 때 경사각 30° 정도의 구조면은 엑셀을 이용하여 현장에서 신속히 그 형태를 추정할 수 있을 것으로 보인다. 경사각 30°인 경우의 구조면의 깊이는 정확히 해석되고 있지만 경사면 자체는 약간의 오차만을 보이는데 이 오차는 경사각이 증가할수록 커진다. 요약하여 본 프로그램은 경사각이 30°보다 작을 경우에는 깊이와 경사면 모두 만족스럽게 규명할 수 있고 깊이만의 관점에서 볼 때 45°에서도 잘 mapping되고 있다.

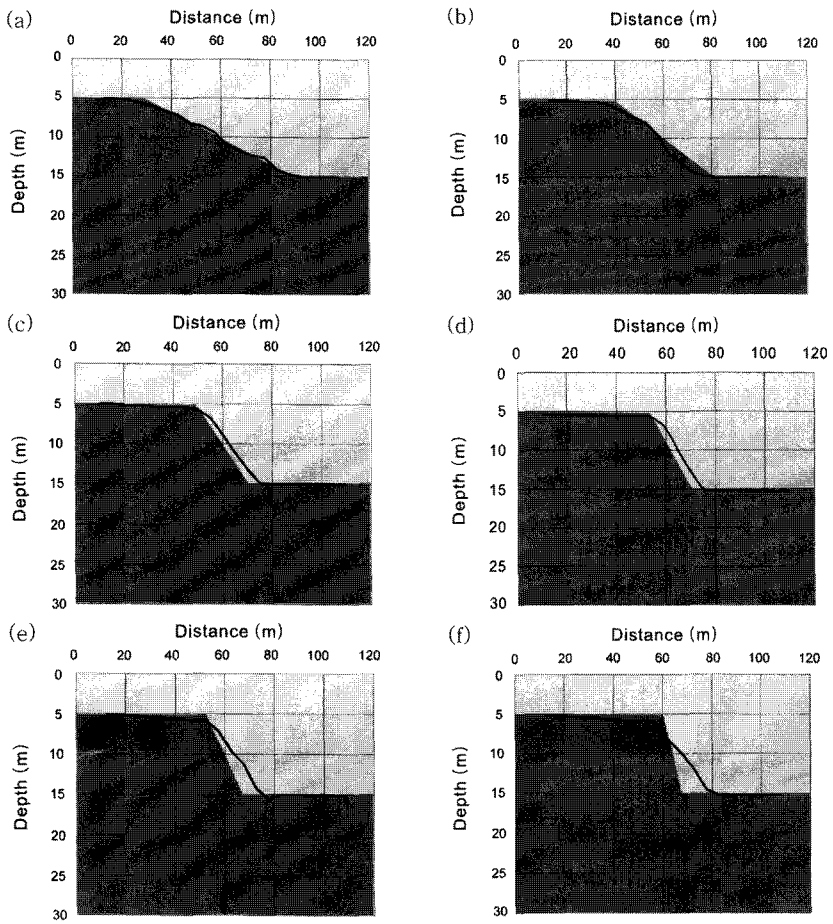

Fig. 7. Input model and GRM inversion results(solid line) for the dip angle of (a) 10°, (b) 15°, (c) 25°, (d) 30°, (e) 45°, and (f) 60°.

4. 청주 화강암체에 대한 적용

일반적인 용어의 속도 검층은 단일 시추공을 이용하여 탄성파(P, S파) 속도의 심도별 분포를 구하는 방법을 말하는데 이를 세분하여 P파만을 측정하는 "속도 검층", P파 및 S파를 측정하는 "PS 검층", 발진기와 수진기를 일련의 프로브에 연결하여 시추공 안의 각 심도별 구간의 전파시간을 측정함으로써 원지반의 P파 및 S파의 속도를 구하는 "SPS 검층", 고주파수 영역의 파동을 이용하는 경우를 "음파 검층"으로 말한다. 지표기진 및 공내 수진방식의 PS 검층으로는 해상탐

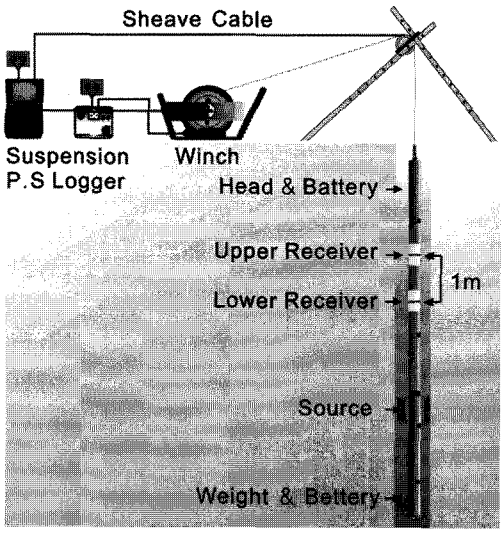

Fig. 8. Schematic diagram of SPS logging system.

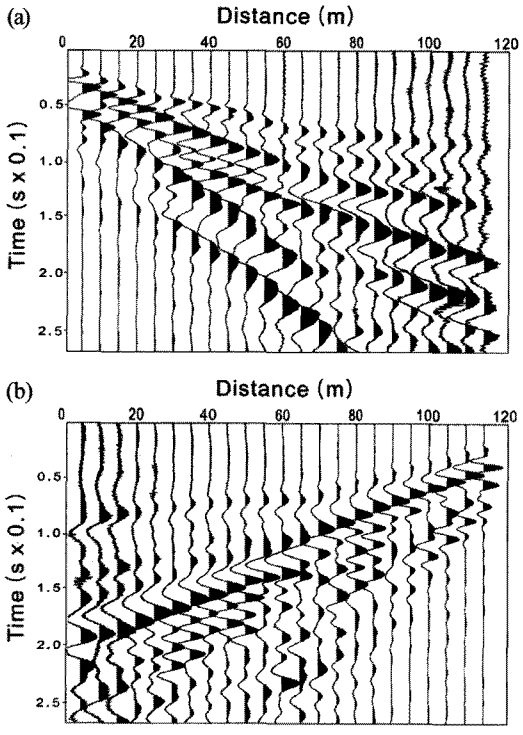

Fig. 9. Field shot gather for the (a) forward-direction and (b) reverse-direction source.

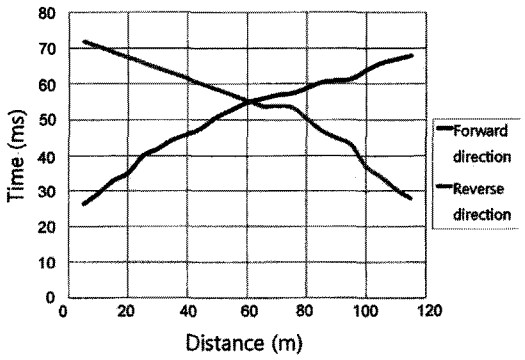

Fig. 10. Forward- and reverse-direction traveltime distance curves for the shot gather of Fig. 15.

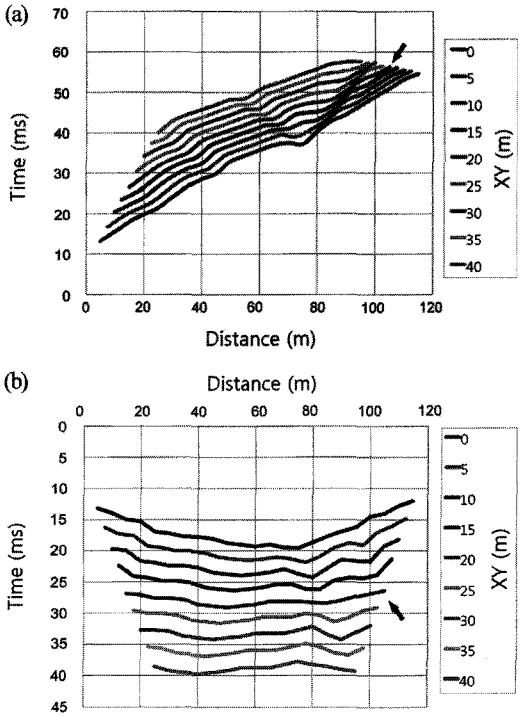

Fig. 11. (a) Velocity analysis curves and (b) time-depth curves for XY spacings from 0 to 40 m. The arrow represents the curve for XY=20 m.

사가 불가능한데 반하여, SPS 검층은 육상은 물론 해상까지도 적용이 가능한 방법이다(Fig. 8).

연구지역에 대한 시추공은 탐사측선의 60 m와 90 m 거리에 각각 위치하고 2 m 깊이까지 물로 채워져 있다. 장비는 OYO사의 Suspension PS Logger(Model-3660A)를 사용하였다.

굴절법 탐사에서는 모형자료와 동일한 조건을 주기 위해 수신기는 모두 23개로 5 m에서 115 m까지 5 m 간격으로 설정하였으며, 해머 타격은 양끝 원거리 5 m 지점에서 1회씩 총 2회 실시하였다(Fig. 9 (a), (b)). 탐사 시스템은 ABEM Mark 6를 사용하였다. 본 지역의 시추조사에서 N-Value를 통해 결정한 청주화강암체의 표토층 깊이가 약 2 m, 탐사시 수신기 간격이 임계거리 이상으로 설정된 점을 고려하여 직접파를 제외한 풍화암과 기반암의 단순 2층 구조로 가정하였다.

Fig. 10은 양쪽발파 기록의 초동을 발췌하여 얻은 주시곡선이고, 이로부터 XY에 대해 계산한 속도분석 함수와 시간-깊이 함수를 각각 Fig. 11의 (a)와 (b)에 보였다. "최적 XY값"은 특히 속도분석 함수를 고려하여 20 m로 선택하였다.

XY=20으로 결정하여 작성된 지하단면도(Fig. 12)는 32~37 m 깊이의 풍화대를 보여주며 60 m와 90 m 거리에 위치한 두 개의 시추공 사이에서 그 깊이는 약 35 m내외로서 이것은 기반암 상부 표면으로 해석하였다.

5. 검층 자료와 탄성파 자료와의 상관

Fig. 13 (a),(b)는 거리 60 m 지점에 위치한 시추공의 하부 수진기와 상부 수진기에 각각 기록된 P파 파

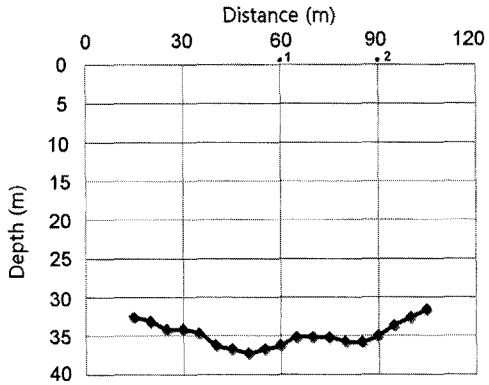

Fig. 12. GRM inversion result. The curve is interpreted as the base of weathered zone(top of the bedrock), with depth variation of 32-37 m. • represents the borehole 1 and borehole 2.

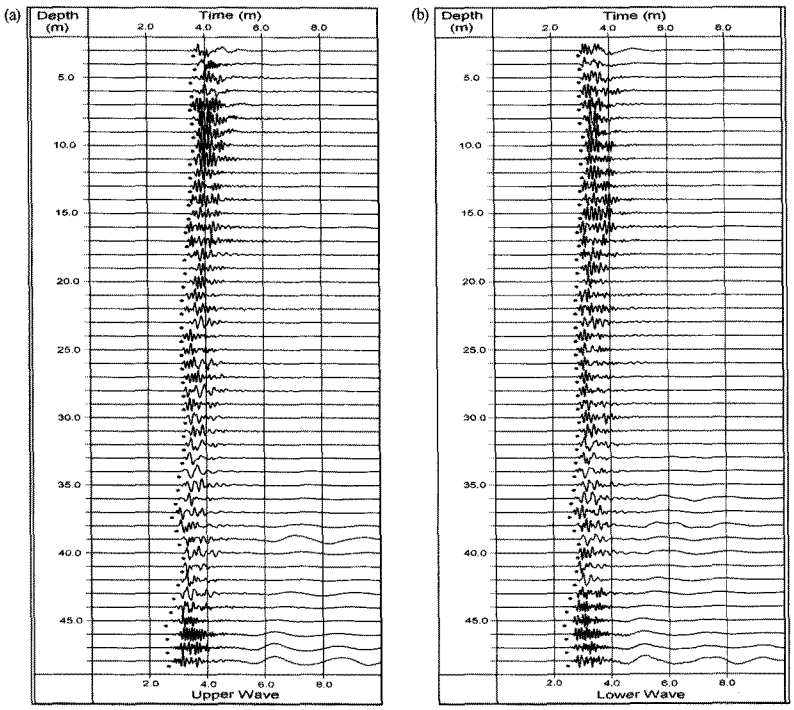

Fig. 13. SPS logging trace for the (a) lower and (b) upper receivers. • shows the first arrival picking.

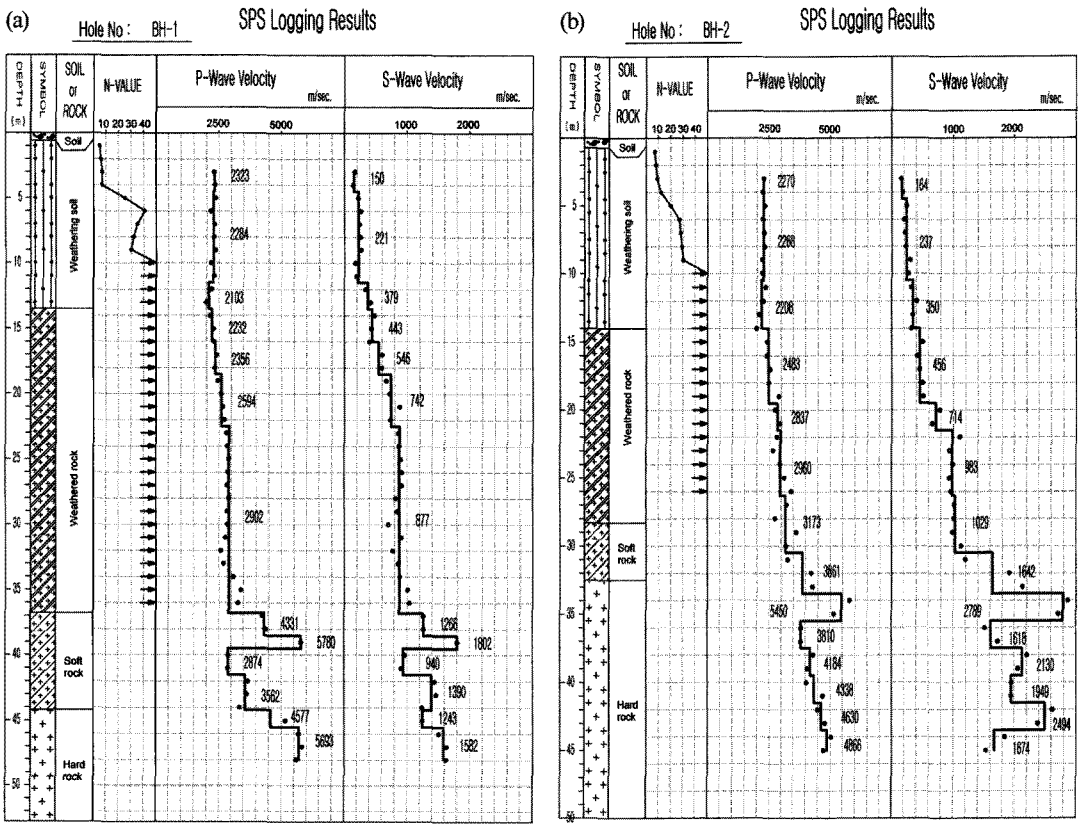

Fig. 14. Drill-core data, N-value, SPS logging trace for (a) borehole 1 and (b) borehole 2. • and bar represents the measured velocity and interpreted interval velocity, respectively.

형이다. 2개의 수진기 사이의 간격은 1 m로 고정되어 있으므로 지반의 구간속도는 두 수진기에 기록된 파의 도달 시간차를 구하여의 계산한다. S파 및 다른 시추공의 구간속도도 같은 방법으로 계산한다.

두 개의 시추공에 대한 SPS 검층의 상부와 하부 수진기에 잡힌 파형으로 작성한 SPS 검층자료와 시추코어 자료를 Fig. 14 (a), (b)에 함께 보였다. 검층자료에서 연암의 표면을 기준으로 P파의 상부층의 평균속도 1984 m/s, 하부층의 평균속도 4400 m/s는 GRM 속도분석 함수의 속도에서 계산된 2000 m/s, 4000 m/s와 거의 잘 상관되고 계산된 속도대비 또한 0.6이하인 점으로 보아 시추자료, 검층자료, 굴절법자료에서 해석한 지하굴절면은 동일한 구조면으로 해석된다.

시추코어 자료에서 35 m와 40 m 깊이는 각각 연암의 상부 표면과 기반암의 표면으로 해석하였는데 이 구간은 SPS 검층자료에서 P파 및 S파 구간속도가 변화하는 구간으로 특징된다. P파 구간속도 자료를 굴절법자료의 결과와 비교할 때(Fig. 15) GRM 분석에서

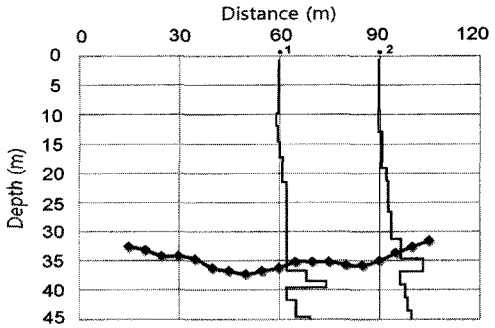

Fig. 15. Correlation of P-wave interval velocities and the GRM inversion results. Depth of the weathered zone, approximately 35 m between borehole 1 and borehole 2, correlates well with the rapid change of P-wave interval velocities.

계산된 32~37 m 깊이의 경계면은 Fig. 14에서 해석한 연암 상부의 표면으로 해석된다. 이것은 Fig. 14의 검층자료에서 속도대비가 연암 상부표면을 기준으로 크게 나타난 점에 기인한다.

6. 결 론

탄성파 굴절법 현장에서 엑셀-GRM을 이용하여 풍화대의 깊이를 추정하는데 있어서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 시추자료에서 확인된 청주화강암 지역의 풍화암과 기반암의 단순 2층 구조는 양단발파 자료만을 가지고 엑셀 작업의 GRM을 적용시켜 그 경계면을 현장에서 신속히 파악할 수 있었다.

2. 본 프로그램은 굴절면의 경사각이 30°보다 작고 상부층과 하부층의 속도대비가 0.6 이하에서 기반암의 깊이와 경사면 모두 규명할 수 있었다.

3. 청주화강암체에 대한 시추자료, 검층자료, GRM 자료에서 해석한 지하굴절면은 동일한 구조면으로 나타나는데 GRM자료에서 도출된 지하 구조면은 연암 및 경암을 포함한 기반암의 상부 표면으로 해석된다.

사 사

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원으로 연구되었음을 밝힌다. 조사를 위해 전체 시추관련 작업을 제공해주신 지오맥스 및 시추자료를 해석해준 이용재 석사에게 감사드린다. 또한 건설적인 논문심사를 해주신 두 분의 심사자분들께도 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

Berryman, J.G. (1989) Fermat's principle and nonlinear traveltime tomography, Physical Rev. Lett., v.62, p.2953-2956.

Burger, H.R. (1992) Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface, Prentice Hall, New York.

Cho, C.S., Lee, H.I. and Suh, J.H. (2002) Interpretation on the Subsurface Velocity Structure by Seismic Refraction Tomography, KSEG, v.5, p.6-12.

Hagedoorn, J.G. (1959) The Plus-minus method of interpreting seismic refraction section. Geophys, Prosp., 158-182.

Kim, J.P. (1991) A Study on the Interpretation of Seismic Refraction Survey Data Using the Generalized Reciprocal Method. Master's thesis, SNU.

Kim, J.S., Song, Y.S., Yoon, W.J., Cho, I.K. and Kim, H.S. (2003) An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Sigma press, 773p.

Lankston, Robert W. (1990) High-resolution refraction seismic data acquisition and Interpretation in Ward, Stanley H., ed., Geotechnical and environmental geophysics; Volume 1: Review and tutorial: SEG Investigations in Geophysics, n.5, p.45-73.

OMNI 3D (2010) Seismic Survey Design & Modeling software, Gedco.

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

Palmer, D. (1981) An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. Geophysics, p.1508-1518.

Palmer, D. (1986) Refraction seismics. Geophysical Press, 269p.

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

Shon, H.W., Kim, J.S., Song, Y.S., Yoon, W.J., Kim, I.S., Suh, M.C., Kim, K.Y., Cho, I.K. and Kim, H.S. (1999) Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface, Sigma press, 751p.

Suspension PS Logger (2002) Suspension PS Logger(MODEL-3660A)& Operation Manual, OYO.

2010년 7월 7일 원고접수, 2010년 11월 1일 게재승인