

대규모 발파 후보지의 지하구조 확인을 위한 탄성과 굴절법 조사

김기영 · 김동훈
강원대학교 지구과학부

요 약

한반도 지각규모 굴절법 조사를 위한 발파 예정지를 결정하기 위하여, 충남 서산의 간척지 2 곳에서 탄성과 굴절법을 실시하여 지하 속도구조를 규명하였다. 골재 채취장과 이 곳에서 동쪽으로 약 2 km 지점에 위치한 매립된 논에서 24채널 2 m 간격의 굴절법 조사를 각각 46 m 씩 실시하였다. 토모그래피 역산법을 이용하여 구한 속도단면은 골재 채취장에서 속도 3,900 m/s 이상의 신선한 기반암이 6 m 정도의 깊이에 위치하여 이상적인 발파 장소로 판단된다. 그러나 매립된 논에서는 기반암의 풍화 정도가 상대적으로 심하고, 풍화대 하부의 기반암 속도도 2,400 m/s 정도로 낮은 편이며, 15 m 정도로 깊게 위치하고 있어서 골재 채취장보다 이상적인 장소가 아닌 것으로 판단된다.

주요어: 굴절법 조사, 발파 예정지, 토모그래피 역산법, 기반암

Ki-Young Kim and Dong-Hoon, Kim, 2002, Seismic refraction surveys to reveal subsurface structures at proposed sites for a large-scale blast. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 5, n. 2, p. 153-161

ABSTRACT: In order to determine blasting sites for the crustal refraction studies in the Korean peninsula, seismic refraction profiling was conducted at two sites in the reclaimed land of Seosan. At a quarry for construction material and another site on a rice field 2 km east of the quarry, 24 channel refraction profiling of 46 m was conducted at a geophone spacing of 2 m. Seismic velocity profiles obtained through tomographic inversion reveal that the quarry is regarded as an ideal place for blasting based on the observation that fresh basements with seismic velocities of 3,900 m/s or greater locate approximately 6 m deep. On the contrary, under the reclaimed rice field, the basements are weathered more, of slower velocities, and buried deeper than the quarry, indicating not an ideal location for detonating seismic explosives of large amounts.

Key words: seismic refraction study, blasting site, tomographic inversion, basements

(*Ki-Young Kim and Dong-Hoon, Kim, Division of Earth Sciences, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-2-dong, Chunchon, Kangwon-do 200-701, Korea, kykim@kangwon.ac.kr*)

1. 서 론

한반도의 상부지각 구조와 나아가 모호면까지의 깊이를 조사하기 위한 지각규모 굴절법 조사가 서산과 포항사이 약 200 km 구간에 걸쳐 준비되고 있으며, 이에 따라 대규모 발파 위치로 적합한 장소를 선정하는 작업이 이루어지고 있다. 발파 장소로 적합한 곳은 발파 에너지가 효과적으로 전달될 수 있도록 파쇄대나 구조선이 거의 없는 신선한 암반이어야 하며, 기반암까지의 깊이가 깊지 않은 곳이 좋다. 또한 대규모 폭발에 의해 발생하는 진동으로부터 피해가 최소화되도록

주변의 민가나 축사 등으로부터 멀리 떨어져 있는 안전한 곳으로 선택하여야 한다.

이러한 조건을 만족시키는 장소 중의 하나로 충청남도 서산의 간척지가 후보지로 선정되었다. 이 지역은 현대건설이 매립공사를 통해 1984년에 간척한 지역으로 대부분 논으로 사용되고 있으며, 주변의 민가나 축사 등이 멀리 떨어져 있어 지리적으로 적합한 발파 장소로 판단되었다. 그러나 이 간척지는 개간된 지 10년이 조금 넘는 지역으로 매립층, 충적층 등 미고결 퇴적층의 두께나 신선한 기반암까지의 깊이, 구조선의 존재여부 등에 대하여 아직 밝혀진 바 없다. 이에 따라 대규모

발파 장소를 선정하기 위하여 대섬(이하 후보지 1) 과 이보다 동쪽으로 약 2 km 떨어진 매립된 논 (이하 후보지 2)에서 굴절법 조사를 실시하였다 (Fig. 1).

과거에 섬이었던 후보지 1은 간척사업에 의해 현재 간척지 내부에 위치하고 있으며, 골재를 채취하기 위한 채석장으로 활용되고 있다. 채석으로 인하여 지표에 기반암이 평탄하게 노출되어 발파 장소로 적합할 것으로 사전에 판단되었다. 후보지 1의 위치가 주변의 민가나 축사 등과 1 km 정도 떨어진 비교적 안전한 곳에 위치하고 있으나, 대규모 발파에 의한 진동이 축사 내의 가축에 영향을 미칠 수 있으며, 후보지 1에서 파쇄대나 구조선이 존재하여 발파가 불가능할 경우에 대비하여 주변 시설로부터 보다 멀리 떨어진 후보지 2를 설정하였다.

후보지 2는 과거에 조간대였던 곳으로 현재 농지로 이용되고 있으며, 가장 가까운 인가가 1.6 km 이상 떨어진 곳에 위치하고 있다. 소규모 발파로 인한 파쇄현상의 유무, 구조선의 존재 여부, 신선

한 기반암까지의 깊이 등을 조사하기 위하여 굴절과 자료를 획득하였으며, 획득된 자료는 굴절과 주시 토모그래피 방식으로 분석하고 해석하였다.

굴절과 주시 토모그래피 방식은 1917년 Radon에 의해 발표된 토모그래피 개념(Deans, 1983)을 굴절과 자료해석에 Hampson and Russell(1984)이 처음 도입하여 사용한 방식으로, 기존 방법들의 전제조건인 층구조를 가정하지 않고 지하 속도구조를 나타내게 되어서 지형과 지질구조가 복잡한 환경에도 적용할 수 있는 장점이 있다. Docherty (1992)는 풍화대층의 두께와 속도를, Lanz *et al.* (1998)은 매몰된 폐기물 처리장의 깊이와 형태 등을 구명하는데 굴절과 토모그래피 방식을 성공적으로 적용하였으며, Hayashi and Takahashi (2001)는 지표에서 뿐만 아니라 시추공에서 측정된 굴절과 자료를 토모그래피 방식으로 해석하여 암석의 특성을 밝히는 방법을 개발한 바 있다. 국내에서는 지표 굴절과 토모그래피 방법을 이용하여 최근 김기영·김동훈(2002a)이 울산단층의 지하 구조를 규명한 바 있으며, 김기영·김동훈(2002b)

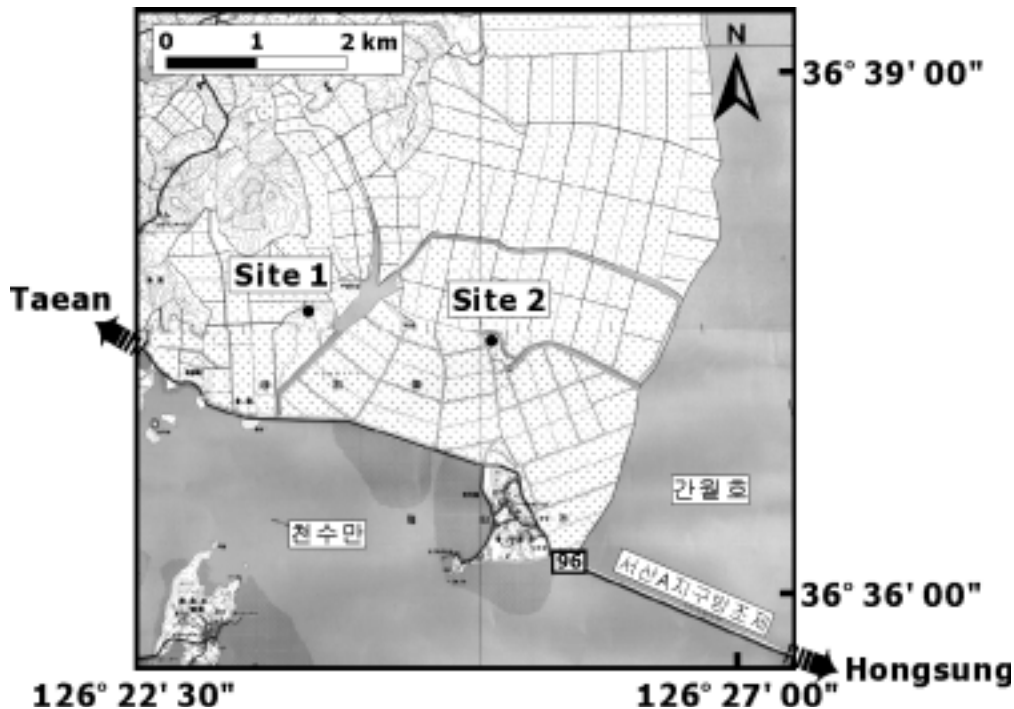


Fig. 1. Location map showing the investigation Sites 1 and 2.

경주시 감산사 부근의 제4기 단층연구에 적용한 바 있다.

발파에 의한 지하구조의 파쇄 정도를 토모그래피 방식으로 확인하는 방법은 Cumerlato *et al.* (1989)에 의해 발표된 바 있다. 그러나 그들은 수신기와 파원을 평행하게 배열하는 부채꼴 발파 (fan shooting) 방식으로 수평 단면도의 결과를 도출한 반면에, 이 연구에서는 수신기와 파원을 동일선상에 배열하는 동일선 전개법(in-line spread)으로 수직 속도 단면을 구하였다.

2. 지형 및 지질

이 논문의 조사지는 충청남도 서산시로 1984년 (주)현대건설에 의해 간척사업이 이루어진 서산간척 A지구이다(Fig. 1). 후보지 주변 일대는 간척사업을 통해 매립된 논으로 평탄한 지형을 이루고 있으나, 후보지 1로부터 북동쪽으로 약 0.6 km 떨어진 위치에 쭈암이섬(22.2 m)이 작은 동산 형태로

남아있다. 남쪽으로는 천수만과 동쪽으로는 서산 A지구 방조제에 의하여 형성된 간월호가 위치한다. 후보지 1은 과거에 섬이었던 대섬으로 간척사업에 의하여 육지화 되었으며, 현재 골재 채취를 위한 채석작업으로 인하여 북동쪽은 이미 평탄화 작업이 이루어져 있다. 후보지 2는 후보지 1에서 동쪽으로 약 2 km 떨어진 곳에 위치하며 간척사업에 의하여 매립된 지역으로, 현재 농지로 이용되고 있다. 후보지 1, 2 모두 주변 건물과 1.2 km 이상 떨어진 곳에 위치하고 있으며, 남쪽으로 후보지 1에서 약 1.2 km, 후보지 2에서 약 1.4 km 떨어진 곳에 A지구 방조제 길인 96번 지방도가 지나고 있다.

이 지역은 간척사업에 의한 매립층(Qr)이 중앙에 넓게 분포하고 있으며, 북쪽으로 선캠브리아기에 생성된 서산층군 태안층의 퇴적암(PCET)과 서산층군 편암류(PCEses), 중생대 쥐라기에 생성된 대보매립암류의 화강암류(Jgr)가 분포하고 있다(Fig. 2; 한국지질자원연구원, 2000). 후보지 1은 주변의

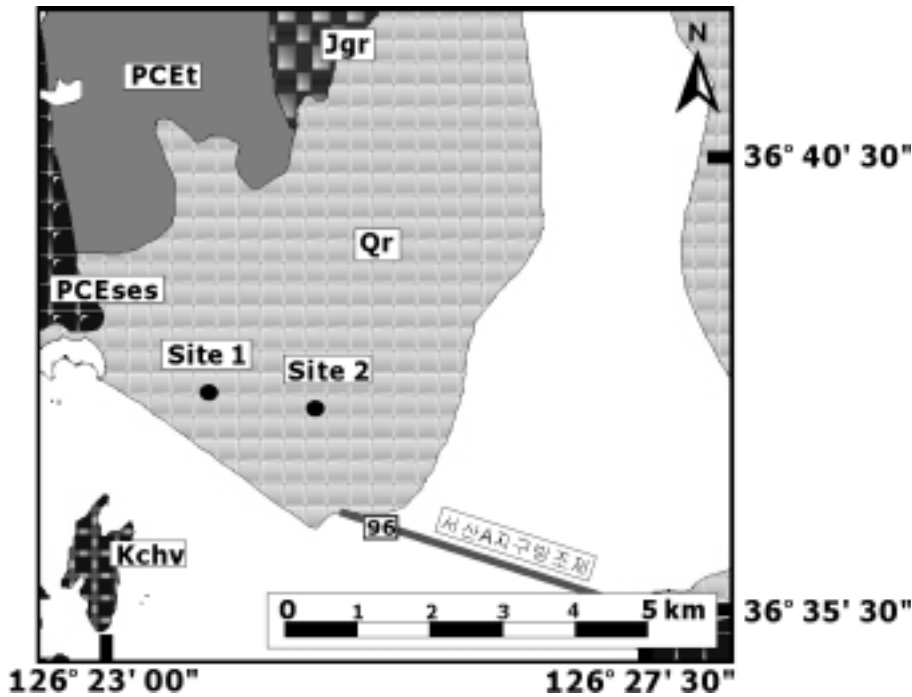


Fig. 2. Geologic map showing Sites 1 and 2 (Modified from KIGAM, 2000). Abbreviations Qr, Kchv, Jgr, PCEses and PCET represent alluvium, volcanics, granites, schists and Tae'an formation, respectively.

매립지와는 달리 대석이 위치했던 곳으로써 채석 작업에 의하여 기반암이 지표에 노출되어 있는 상태이며, 후보지 2는 간척사업이 이루어진 매립지 역으로 신생대 충적층으로 이루어져 있다.

3. 자료획득

후보지 1은 채석 중인 단단한 암석들이 주변에 널려 있으며(Fig. 3), 수신기를 바닥에 설치하기 힘들 정도의 매우 비교적 신선한 기반암이 지표에 노출되어 있다. 이와는 대조적으로 후보지 2는 매립된 논으로 지표가 매우 연한 점토로 구성되어 있다. 후보지 1과 2 모두 고도를 무시할 수 있을 정도의 평탄하고 주변 소음이 거의 없는 이상적인 조사 환경을 제공하였다.

후보지 1과 2에서 각각 1개씩의 측선을 설정하여 굴절법 조사를 실시하였다. 측선 길이는 후보지 1, 2 모두 46 m로 2 m 간격마다 수신기를 설치하였으며, 24채널로 수신하였다. 전개 방식은 타격점과 수신기 배열의 위치가 동일선상에 놓이는 동일선 전개로 하였으며, 후보지 1에서는 지오폰 전개의 양단 2점, 1/4점, 중앙점, 3/4점 및 양단에서 10 m 떨어진 원격 2개점 등 총 7개 타격점에서, 후보지 2에서는 양단에서 27.8 m 지점의 원격 2개점을 더해 총 9개 타격점에서 5 kg 해머

로 알미늄판을 타격하여 인공적으로 소규모 지진파를 발생시켰다. 각 타격점에서는 3회씩 타격함으로써 300% 수직중합을 실시하여 신호/잡음비를 높였다. 수신기는 100 Hz 고해상도 지오폰 24개를 사용하였으며, 수신된 신호는 OYO사의 탄성과 기록계인 McSeis-SX를 사용하여 수직방식으로 기록하였다. A/D 변환은 0.2 ms의 샘플률로 204 ms 동안 기록하였으며, 기록계의 동적기록범위가 108 dB로 비교적 넓어서 현장에서 아날로그 필터는 적용하지 않았다(Table 1).

Table 1. Acquisition parameters.

Source	5 kg sledgehammer
Vertical Stack	300%
Receiver	100 Hz Geophone
Receiver Spacing	2 m
Number of Channel	24
Recorder	OYO McSeis-SX
Record Length	204 ms
Sampling Interval	200 μ s
Analog Filter	Not Applied
Number of Record	Site 1 : 7, Site 2 : 9



Fig. 3. Acquisition scene at Site 1. Basements are exposed at the surface due to quarrying rocks.

4. 자료처리

획득된 자료는 OYO사의 상업용 소프트웨어인 SeisImager/2D를 이용하여 처리하였으며, 포맷변환, 파원-수신기 배치정보 입력, 초동선택, 속도분석, 고도자료 입력, 토모그래피 역산 등의 순으로 진행되었다(Fig. 4).

기록계에 수치자료 형태로 저장된 원시자료(Fig. 5a)의 포맷을 자료처리용 소프트웨어의 내부포맷인 SEG-2 형태로 변환한 후, 수신기 및 타격점 위치를 입력하고 초동을 선택하였다(Fig. 5b). 초동만을 이용하여 자료를 처리하는 탄성과 굴절법은 초동 선택이 결과에 직접적인 영향을 미치므로 양단주시 일치성 및 주시곡선의 평행성에 유념하여 신중하게 선택하였다. 각 후보지의 타격점에 대한 모든 초동선택 자료는 후보지별로 파일에 저장한 후, 주시곡선을 그리고 속도분석을 실시하였다.

표층속도는 주시곡선상의 첫번째 기울기로부터, 하부층들의 속도는 양단주시곡선에서 구간별로 속도를 구하였다. Fig. 6a는 후보지 1의 주시곡선 위

에 속도분석을 실시한 결과를 보여주며, 표층속도와 기반암의 속도가 500 m/s와 3,900 m/s 정도임을 나타내고 있다. 후보지 2도 같은 방법으로 속도를 분석하였으며, 그 결과 표층속도는 300 m/s, 가장 높은 속도는 1,600 m/s 정도로 나타난

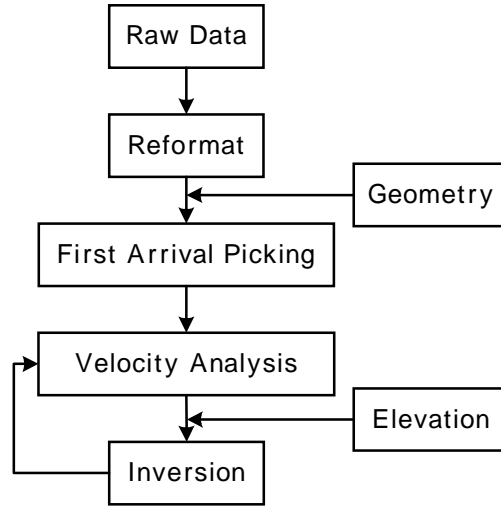


Fig. 4. Sequence for the data processing.

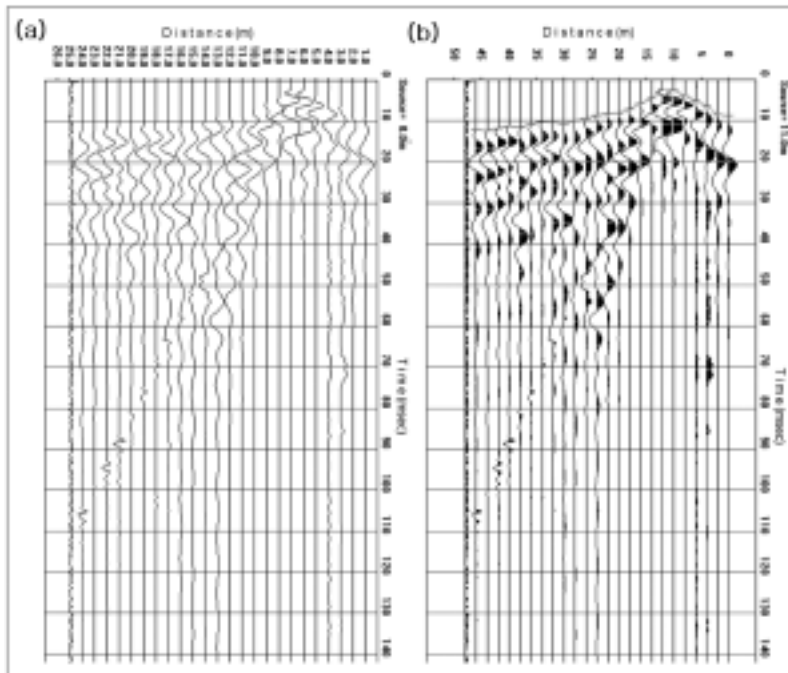


Fig. 5. (a) Raw data and (b) first arrivals picked on the same data recorded at Site 1.

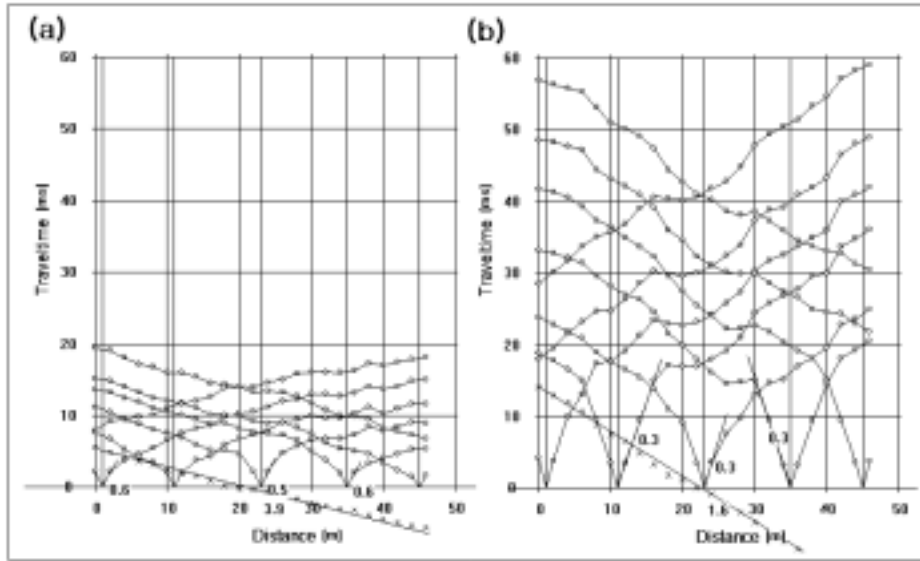


Fig. 6. Traveltime curves for refraction data at Sites (a) 1 and (b) 2, respectively, on which velocity analyses were conducted.

다(Fig. 6b). 이러한 속도분석 과정을 통해서 얻은 구한 표층과 기반암의 속도정보는 역산 초기모델의 속도범위를 정하는데 사용하였다.

두 후보지의 상대고도가 무시할 수 있을 정도로 평탄하였으므로 고도를 0으로 입력하였으며, 역산을 수행하기 위한 초기모델은 깊이에 따라 단순히 속도가 증가하는 모델을 사용하였다. 후보지 1, 2에 공히 적용할 수 있도록 400~4,000 m/s의 수직적 속도 변화를 갖는 속도 범위를 선택하였다. 10개 및 15개 층을 갖는 두 가지 모델을 시험하여 보았으나, 시험 결과 두 모델의 차이가 크지 않아서 15개 층을 초기모델에 사용하였다.

후보지 1, 2 모두 10번의 반복수행을 거쳐 평균제곱근 오차가 각각 0.32 ms와 1.10 ms 이내가 되도록 역산을 수행하였다. Fig. 7은 초기모델을 대상으로 파선추적을 실시하여 주시를 계산한 후, SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) 역산방식을 이용하여 얻은 속도분포 결과로써, 역산에 사용한 쉘의 크기와 모양을 함께 표시하였다. 쉘의 폭은 수신기 간격과 동일한 2 m 간격이고, 모델의 층 숫자는 파선의 수보다 많은 15개로 내삽된 쉘들이 포함되어 있다. Fig. 8은 Fig. 7의 속도토모그램에 가중치 1/4, 1/2, 1/4

의 3점 동평균한 결과로, 파선경로와 타격점을 함께 표시하였다. 각 후보지에서 사용한 모든 타격점에 대한 자료가 역산과정에서 사용되었으나, 그림 상에서는 지오폰 전개구간 내의 타격점만을 표시하였다. Fig. 9는 Fig. 8의 동평균 속도도모그래피 결과를 등치선도로 나타낸 것으로 후보지 1의 결과가 후보지 2의 결과보다 높은 속도를 나타내고 있다.

5. 자료해석

Fig. 9a의 후보지 1에서는 400~4,000 m/s의 속도분포를 보이며, 기반암이 지표에 노출되어 있는 채석장인 점을 감안할 때, 속도 400~800 m/s, 평균 두께 1 m 정도의 표층은 소규모 발파에 의해 기반암이 파쇄된 부분으로 해석된다. 3,900 m/s 이상의 속도를 갖는 신선한 기반암은 후보지의 남서쪽에서는 8 m, 북동쪽에서는 6 m 깊이에 각각 나타난다. 대체로 수평적으로 평탄한 속도분포를 갖는 구조를 보이며, 속도 이상대가 나타나지 않아서, 적어도 규모가 큰 파쇄대나 지질 구조선은 존재하지 않는 것으로 보인다. 또한 신선한 기반암까지의 깊이가 6~8 m 정도로 얁아서 발파를

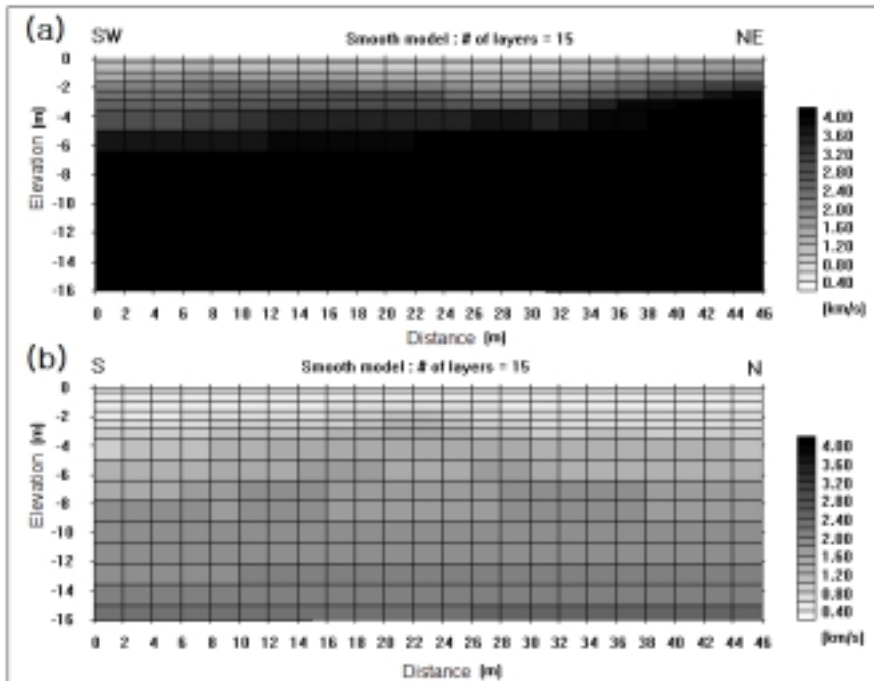


Fig. 7. Velocity tomograms for Sites (a) 1 and (b) 2, respectively. Cell boundaries are superimposed on the tomograms.

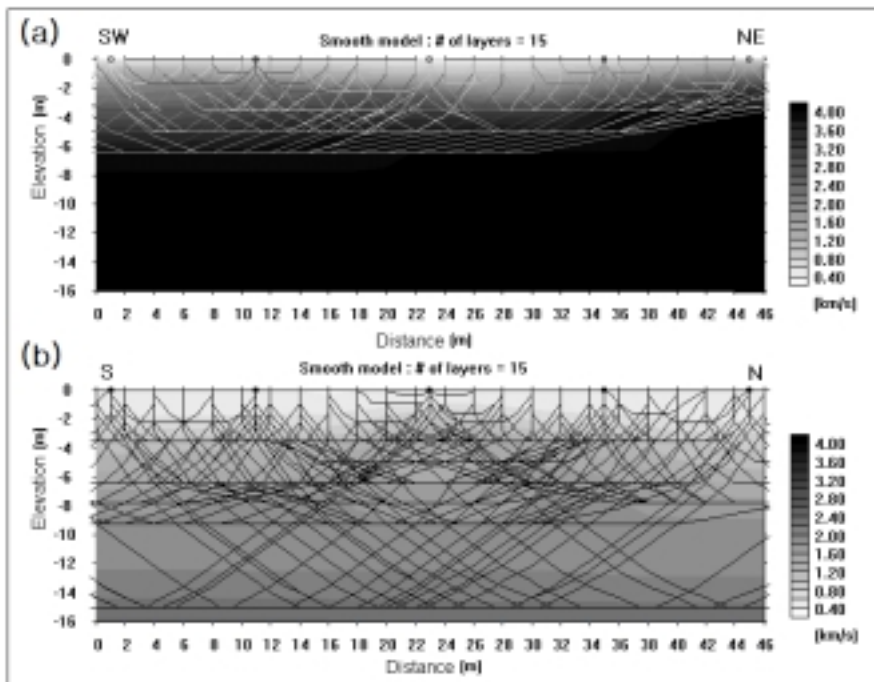


Fig. 8. Moving averaged tomograms at Sites (a) 1 and (b) 2, respectively. Raypaths are superimposed on the tomograms.

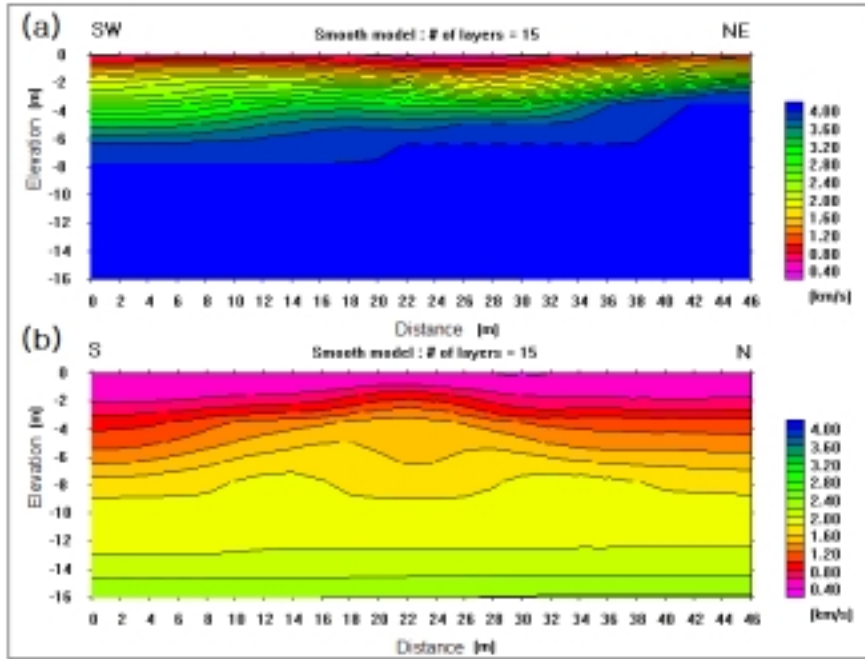


Fig. 9. Seismic velocity contours for Sites (a) 1 and (b) 2, respectively.

위한 시추공의 깊이가 깊지 않아도 무방할 것으로 판단된다.

반면에 Fig. 9b의 후보지 2에서는 후보지 1에 비해 전반적으로 낮은 속도분포를 보인다. 600 m/s 이하의 속도를 갖는 표층이 축선 양단 부근에서 최대 2 m 정도의 두께로 분포하며 중앙부에서는 1 m 정도로 얇은 것으로 나타난다. 그 하부에 600 ~1,400 m/s의 속도를 갖는 층이 2~3 m 정도의 두께를 가지며 기반암층 상부에 분포한다. 속도 2,400 m/s 이상의 신선한 기반암과 그 상부의 풍화된 기반암의 경계는 약 15 m 깊이에 수평으로 분포하는 것으로 해석된다. 후보지 1에서와 같은 신선한 기반암이 조사결과 나타나지 않으므로 후보지 1보다 이상적인 발파장소로 볼 수 없으나, 후보지 1에서의 발파가 불가능할 경우 최소한 2,400 m/s 이상의 속도를 보이는 깊이 15 m 이하까지 시추한 후 폭약을 설치하는 것이 좋다고 판단된다.

6. 결론

한반도 상부지각과 모호면까지의 깊이를 조사

하기 위한 지각규모 굴절법 연구를 위한 발파 후보지의 지하구조를 소규모 탄성과 굴절법으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 골재 채취장인 후보지 1은 기반암이 지표에 노출되어 있으며, 1 m 정도 깊이까지는 발파에 의한 파쇄현상으로 인해 800 m/s 정도의 낮은 속도분포를 보인다. 또한 조사구간 내에서는 적어도 큰 규모의 구조선이나 파쇄대가 발견되지 않으며, 3,900 m/s 이상의 속도분포를 갖는 신선한 기반암까지의 깊이도 6 m 정도로 이상적인 발파장소로 판단된다.

2. 간척된 농지인 후보지 2는 후보지 1 보다 신선한 기반암까지의 깊이도 깊고, 속도도 전반적으로 낮은 분포를 보이고 있다. 최대 2 m 깊이까지의 표층은 간척사업에 의한 매립층으로 보여지며, 기반암과 매립층 사이에 600~1,400 m/s의 속도를 갖는 층이 존재한다. 그 하부는 풍화를 받은 기반암과 속도 2,400 m/s 이상의 비교적 신선한 기반암이 깊이 15 m를 경계로 나뉜다.

3. 종합적으로 후보지 1에서의 발파가 주변 환경이나 주민 피해 등의 불가피한 사정으로 불가능한 경우가 아니면 후보지 2보다 발파 장소로 적

합하다고 판단되며, 후보지 2에서 발파를 실시하여야 할 경우에는 발파 깊이를 15 m 이상으로 하여야 할 것이다.

사 사

이 연구는 과학기술부 특정기초연구의 일환으로 이루어졌음을 밝히며, 강원대학교 자원개발연구소의 재정적 지원에 감사드립니다. 현장조사에 수고하여 준 이소영 석사와 강원대학교 이창민 학생에게 감사를 표합니다.

참고문헌

김기영, 김동훈, 2002a, 굴절파 토모그래피에 의한 지하 물성 특성 연구, 지반·환경 물리탐사 특별 심포지움, 제2회 자원개발연구소 학술 심포지움, p. 251-260.

김기영, 김동훈, 2002b, 경주시 감산사단층 부근에서의 탄성파 굴절법 조사, 지구물리, 5, 41-50.

한국지질자원연구원, 2000, 대전지역 인터넷 지질도

(1:250,000).

Cumerlato, C. L., Stachura, V. J. and Tweeton, D. R., 1989, Application of refraction tomography to map extent of blast-induced fracturing: 59th Ann. Internat. Mtg., Soc. of Expl. Geophys., 360.

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

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.

2002년 5월 7일 원고접수
 2002년 6월 21일 원고채택