

탄성과 토모그래피 단면측정 데이터 분석 및 해석: 현장응용 사례*

김중열¹⁾ · 김유성¹⁾ · 현혜자¹⁾

Interpretation and Analysis of Seismic Crosshole Data: Case History

Kim, Jung-Yul, Kim, Yoo-Sung and Hyun, Hye-Ja

요 약 : 최근 시추공을 이용한 탄성과 토모그래피는 국내 토목분야 지반조사에서 상당한 몫을 차지하고 있다. 비록, 발생원-수진기 배열 구간의 제한으로 인하여 기대된 탄성과속도 분포가 그만큼 왜곡된다고 하더라도 그의 분해능은 그래도 다른 지표 조사기법보다 우월하기 때문이다. 그런데, 국내 천부지질에서는 경암과 풍화암이 인접되고 있는 경우가 허다하며 더구나 일부 수진간격에서 굴절파의 도달이 초동으로 인식되어 토모그래피의 분해능이 크게 저해될 수 있는 것이다. 이러한 문제에 근원적으로 대처하기 위해서는 초동주시 이외에도 측정데이터에 담겨있는 제반 탄성과 도달을 분석하고 또한 그에 대한 이해도를 높이는 것이 바람직하다고 하겠다. 예를 들면, 튜브파에 대한 분석은 절리의 존재 및 연장 상태 뿐만 아니라 물의 유동상태 판단에도 기여할 수 있는 것이다. 따라서 본 논문의 주요 내용은 지난 수년간의 현장응용 사례를 바탕으로 측정데이터 자체를 이해할 수 있는 다양한 분석 및 해석 기법을 서술함으로써 지반 상태에 대한 판단력을 높일 뿐만 아니라 나아가서 불가피하게 발생되는 토모그래피의 왜곡을 최소화할 수 있는 기본 자료를 제시할 수 있음을 보여주는데 있다. 튜브파 관찰에 의해 인식된 절리들은 텔레뷰어 이미지 및 수리측정 결과와 상호 비교하고 있으며 또한 발파점 및 수신점 기록을 활용하여 그들을 찾는 분석법을 제시하고 있다. 해성 실트질 점토에 대한 탄성과전달 연구는 그 지역의 토모그래피 응용을 위한 지침을 보여주고 있다. 한편, 측정데이터에서 관찰되는 주요 탄성과 도달을 수치모형실험과 상호 비교함으로써 초동 판단에 대한 이해도를 높이고 있다.

Abstract : Recently crosshole seismic tomography has come to be widely used especially for the civil engineering, because it can provide more detail information than any other surface method, although the resolution of tomogram will be inevitably deteriorated to some extent due to the limited wavefield aperture on the nonuniqueness of travelttime inversion. In addition, our field sites often consist of a high-velocity bed rock overlain by low-velocity rock, sometimes with a contrast of more than 45 percent, and furthermore the bed rock is folded. The first arriving waves can be then the refracted ones that travel along the bed rock surface for some source/receiver distances. Thus, the desirable first arrivals can be easily misread that cause severe distortion of the resulting tomogram, if it is concerned with (straight ray) travelttime inversion procedure. In this case, comparison with synthetic data (forward modeling) is a valuable tool in the interpretation process. Besides, abundant information is contained in the crosshole data. For instance, examination of tube waves can be devoted to detecting discontinuities within the borehole such as breakouts, faults, fractures or shear zones as well as the end of the borehole. Specific frequency characteristics of marine silty mud will help discriminate from other soft rocks. The aim of this paper is to present several strategies to analyze and interpret the crosshole data in order to improve the ability at first to determine the spatial dimensions of interwell anomalies and furthermore to understand the underground structures. To this end, our field data are demonstrated. Possibility of misreading the first arrivals was illustrated. Tube waves were investigated in conjunction with the televiewer images. Use of shot- and receiver gathers was examined to benefit the detectabilities of discontinuities within the borehole.

Keywords : 탄성과 토모그래피, 지반조사, 분해능, 초동판단

서 론

탄성과 토모그래피가 국내 기술진에 의해 최초로 현장응용되어 기대된 성과를 거둔 곳은 1990년 경북 상주 소재 계림 탄광이었다고 볼 수 있다(Kim *et al.*, 1994). 당시 탐사 대상은 두 갱도에 의해 둘러싸인 암반(약 350 m × 350 m 블록)이었으며 탐사 목적은 탐사 단면에 표출되는 경암 및 탄층 주위 파쇄대 분포를 규명하는 것이었다. 비록 갱도 주위에 탄성

파 발생원(다이내마이트)과 수신기(2성분 속도 수신기)가 자유자재로 구사될 수 있음은 토모그래피 본연의 측정 여건에 부합되는 것이었으나 반면, 탐사 대상 규모는 주어진 지질 여건에 비추어 상대적으로 큰 것이었다. 전체적으로 현장탐사의 효율성은 낮은 편이었으며 더구나 당시 국내 석탄사업의 사양화는 그나마 갱내 토모그래피 기술 개발을 저해하는 또 다른 요인이 되었다고 볼 수 있다.

지표에서 두 개의 시추공을 이용하는 토모그래피 즉, 시추

*1998년 4월 11일 접수

1) 한국자원연구소(Korea Institute of Geology, Mining & Materials)

공-시추공 탄성과 토모그래피는 1991년 부산 근교에서 역시 국내 기술진에 의해 시도되었으며 그 과정에서 탄성파를 시추공 내에서 일으키기 위한 중추 낙하(weight drop)형 시추공 발생원("도방" 명명)과 두 성분 속도 수신기로 구성된 수신장치("알아리" 명명, 24채널)가 개발되었다(Kim *et al.*, 1994). 여기서는 비록 발생원의 방사형과 공벽에 밀착된 두 성분 속도 수신기 기능에 의해 S파의 도달도 훌륭하게 기록될 수 있었으나 반면, 탐사의 전체적인 효율성(예: 탐사 시간, 탐사 인력 및 측정의 다양성)은 크게 떨어지는 것이 되었다. 더구나 토목분야 지반조사에서는 우선 탐사 경제성 측면에서도 그의 응용성이 기대될 수 없다고 판단되었다. 따라서, 국내 토모그래피 기술의 보편화를 위해서는 무엇보다 새로운 측정시스템 개발이 촉구되었다. 가장 폭 넓은 주파수 대역을 갖는 탄성파 발생원은 폭발성 발생원이다. 그러나 당시 국내에는 탄성파 탐사 전용 뇌관이 생산되지 않았으며 더구나 토모그래피 응용을 위해서는 보다 엄격한 조건(발파 시점의 일관성: 0.01 msec 이내, 발파 지연시간의 극소화)을 갖춘 뇌관의 개발이 요구되었다. 이에 대한 한국자원연구소와 (주)한화의 지속적인 공동연구는 새로운 뇌관의 개발로 이어지게 되었으며 그로 인해 국내 특유의 시추공 발생원이 선보이게 된 것이다(Kim *et al.*, 1993). 이러한 뇌관은 그 이후 끊임없이 보완되어 현재에는 세계적인 기술 수준에서 독보적이라 할 수 있는 소위 시추공 다중 발파시스템 개발에 이르기까지 진전하게 된 것이다(Kim *et al.*, 1997). 한편, 24 및 48개의 하이드로폰으로 구

성된 수신 장치("줄주리" 명명)도 제작함으로써 우선 이전과는 달리 운용의 용이성을 크게 높일 수 있었음은 물론 고주파수 탄성파도 쉽게 감지 할 수 있게 되었다. 이와 병행하여 데이터 제어장치도 고분해능화(샘플링 간격이 1/128 msec도 가능)하여 총체적으로 하나의 효율적인 새로운 측정 시스템이 배태되었다(Kim *et al.*, 1995). 현재 국내에는 상기 시스템이 널리 보급되어 활용되고 있다.

탄성과 토모그래피에 대한 이론 연구도 그 동안 국내에서 대체로 역산법 개발 및 응용에 중점을 두면서 활발하게 진행되어 왔으며(Song, 1990; Kim *et al.*, 1991; Yoon, 1991; Lim, 1992; Chang *et al.*, 1993; Kim, 1994; Park, 1997) 그에 따라 다양한 토모그래피 전산처리 시스템이 구축되어 사용되고 있다. 여기서 제시되는 대부분의 역산 기법은 대체로 대동소이한 결과(토모그램: 탄성과 속도 분포)를 초래한다고 볼 수 있다. 따라서 바람직한 토모그래피 결과는 일반적으로 역산 기법 그 자체보다는 오히려 입력되는 데이터의 타당성과 토모그램 왜곡에 대한 폭 넓은 이해도에 의해 보다 크게 좌우될 수 있는 것이다. 특히, 국내에서 주어진 대부분의 토모그래피 탐사 대상은 우선 ① 경암과 풍화암의 탄성과 속도가 상대적으로 큰 대조를 보여주고 있으며, ② 여러 차례의 지각 변동에 의해 암층 경계면이 일관성을 잃고 있는 경우가 많기 때문에 비록 양질의 측정 데이터를 바탕으로 최적의 역산 기법이 응용되었다 하더라도 그 결과는 주어진 지질 상태와 크게 어긋나는 경우가 있음을 현장 실험에서 흔히 경험하게 된다. 이러한 문제에

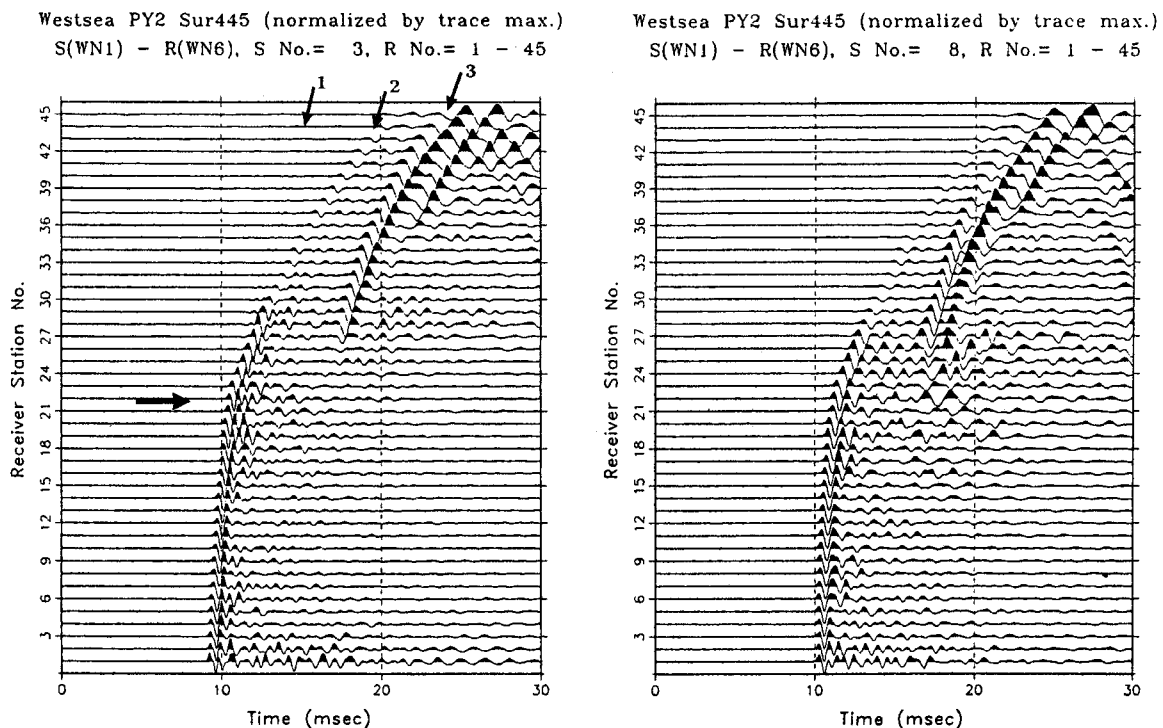


Fig. 1. Examples of crosshole seismic data at the survey site Seo-Hae Grand Bridge. Various arrivals are observed. Arrow 1 corresponds to the waves that travel along the steel casing, arrow 2 to the refracted waves and arrow 3 to the first arrivals used for the traveltime inversion. Left: shot gather 3, right: shot gather 8.

대처하기 위해서는 무엇보다 측정 데이터 자체에 대한 철저한 분석이 수반되어야 하며 그로 인한 풍부한 정보는 토모그래피 해석을 위해 반영되어야 함이 바람직하다고 하겠다. 따라서, 본 논문의 주요 내용은 지난 수년간의 다양한 현장응용 사례를 예시함으로써 측정데이터 분석이 토모그래피 왜곡을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 나아가서 지질 상태에 대한 또 다른 귀중한 정보를 제시할 수 있음을 보여주고 있다.

현장 응용 사례 및 그에 따른 데이터 분석

서해안 고속도로 건설공사 중 약 7.5 km에 달하는 서해대교에는 두 개의 사장교 주탑(높이 약 182 m)시설이 계획되어 현재 시공 중에 있다. 탐사 당시는 해수면으로부터 약 10 m 까지 배수가 된 상태라써 그 중앙부의 면적 약 34 m × 74 m 에서 터파기 공사가 계획되고 있었다. 당시 탐사 목적은 터파기 심도 판단 및 시공을 위한 기초 자료를 제시하는 데 있었으며 이를 위해 약 10개에 달하는 단면 측정이 수행되었다. Fig. 1은 그 중 한 단면 측정(시추공 간 거리 약 43 m)에 대한 발파점 기록(shot gather)으로 발생원 번호 3 및 8 각각에 대한 45 채널 기록을 나타내고 있다. 대체로 수진공의 수진기 번호 약 22번 위치를 경계(화살표로 표시)로 초동 주시의 큰 변화가 관찰되고 있으며 동시에 그로부터 굴절파(화살표 2번 표시) 도달이 인식되고 있다. 따라서 이 심도(수진공)는 바로 경암 상부 경계면에 해당된다. 주시 역산을 위한 초동주시의 발체 과정에서 굴절파의 도달 이외에도 시추공 케이싱(강철)

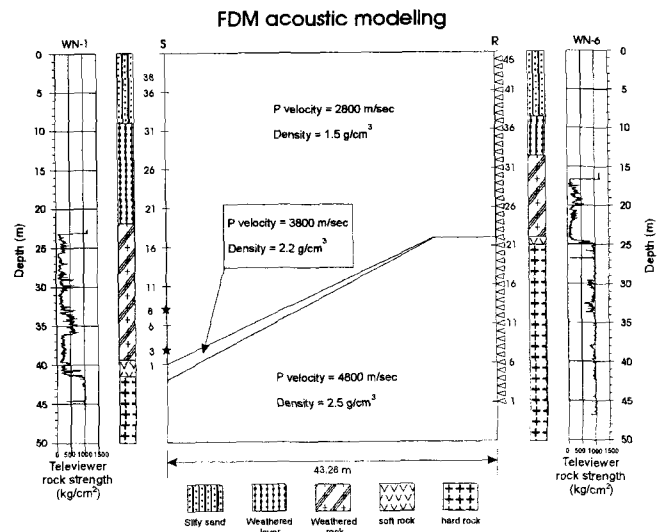
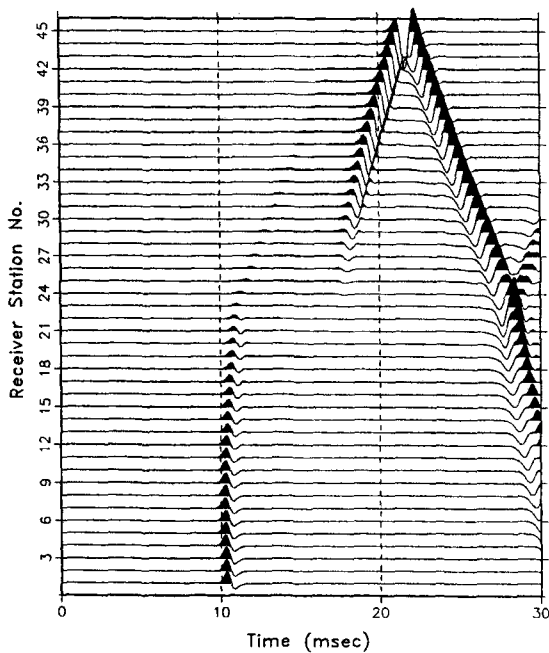


Fig. 2. FDM acoustic modeling. A simplified numerical model was established based on the core log data, televiwer rock strength.

을 따라 전달된 탄성과 도달(화살표 1번)에 의해 흔히 발체 오류가 발생될 수 있다. 이러한 탄성과 전달경로는 발생원에서 대체로 경암 경계를 따라 전달된 탄성파가 수진공의 경암 상부 경계면에 도달된 후 그로부터 강철 케이싱을 따라 위로 전달된 경우이다. 이미 지적인 굴절파 도달은 흔히 초동으로 쉽게 판단될 수 있다. 그러나, 상기 주시역산 과정에서는 화살표 3으로 표시된 탄성파의 도달이 실질적인 초동이 된다는 것

Westsea PY2 Sur445 (FDM acoustic modeling)
S(WN1) - R(WN6), S No.= 3, R No.= 1 - 45



Westsea PY2 Sur445 (FDM acoustic modeling)
S(WN1) - R(WN6), S No.= 8, R No.= 1 - 45

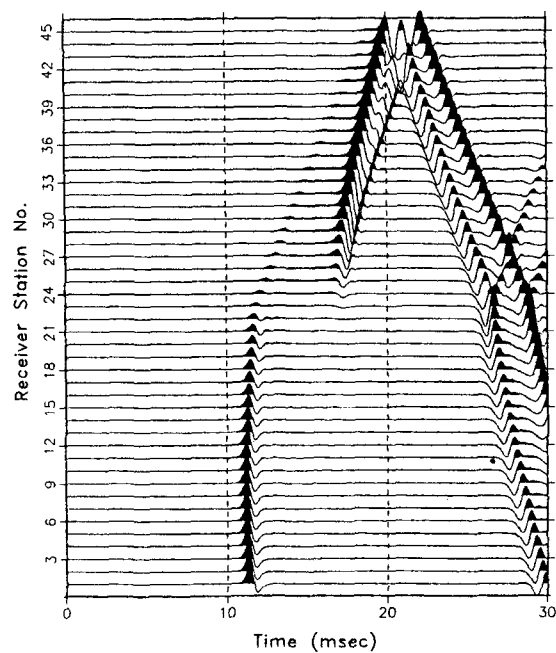


Fig. 3. FDM acoustic modeling. The refracted- and direct wave arrivals between boreholes are well matched to those of real data in Fig. 1. Left: shot gather 3, right: shot gather 8.

이다. 이에 대한 이해를 높이기 위해 Fig. 2에는 단순한 수치 모형을 제시하고 있다. 시추 주상도 및 텔레뷰어 암석강도(Kim and Schepers, 1995; Kim *et al.*, 1996)에 근거하여 양쪽 시추공의 경암 상부 경계면 심도는 약 18 m 정도 차이가 있으며 모형 설정에서 풍화암의 탄성과 속도는 경암의 약 42%에 해당하는 큰 대조를 나타내고 있다. 여기서 발생원 위치는 별표로 표시하고 있다. Fig. 3은 상기 수치 모형을 대상으로 유한차분법(FDM acoustic modeling: Cho, 1992)에 의해 계산된 합성 탄성과 기록을 나타내고 있다. 이들은 초동 판단 측면에서 측정 데이터(Fig. 1 참조)와 훌륭한 대조를 보여주고 있음에 비추어 화살표 2로 표시한 탄성파의 도달은 바로 굴절파임이 입증되고 있다. 따라서 여기서 발췌된 초동 주시치는 직선 파선으로 가정된 역산 기법의 입력 데이터로는 부적합한 것이다. 이와 유사한 예는 국내 지질 여건에 비추어 흔히 관찰될 수 있다.

국내에서 부산 지역 일대는 연약 지반으로 알려져 있다. Fig. 4는 전력구 공사 지반조사(부산 염곡동 지역)를 위해 수행된 단면 측정 과정을 나타내고 있다. 시추 주상도에 의하면 여러 형태의 연약한 퇴적층이 박층으로 호상을 띠고 있음을 볼 수 있다. Fig. 5는 발생원 번호 18에 대한 기록(Fig. 4의 파선 진행도 참조)과 그에 따른 주파수 내용을 보여주고 있다. 수진기 번호 13~24 사이에는 상대적으로 고주파수를 띤 탄성파의 도달이 뚜렷하게 관찰되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 고주파수 탄성파의 진폭 크기를 그 주위의 것과 상대적으로 비교하기 위하여 Fig. 6에는 발파점 기록 전체 트레이스의 최

Geometry for Tomographic Analysis

Pusan Eomgung Survey No. 604

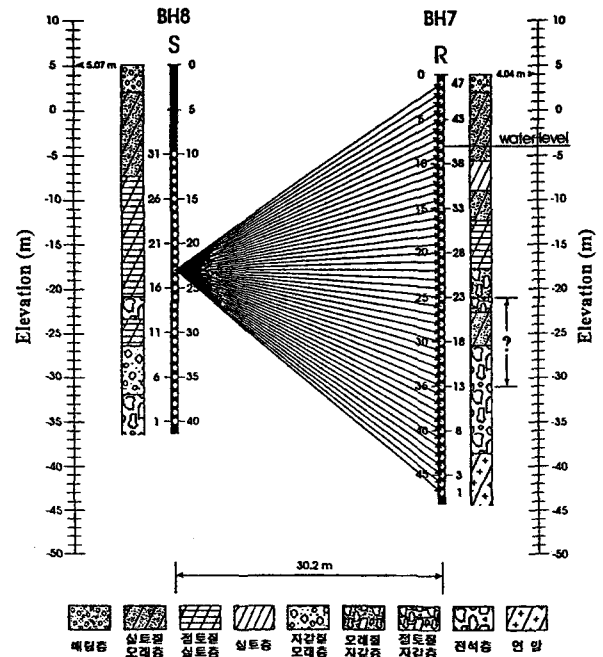
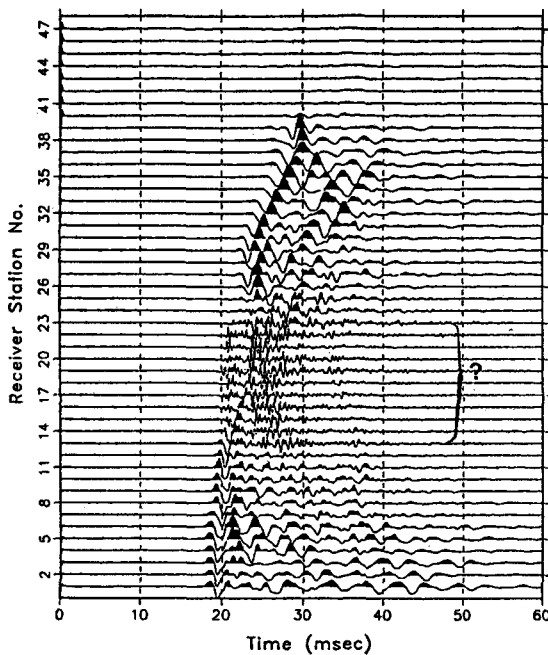


Fig. 4. Geometry of source and receiver array for seismic tomographic measurement at the survey site Pusan. Raypaths from shot no. 18 to 47 receiver stations are depicted by straight lines. Core logs show lots of thin layers mainly composed of silt, clay, sand and gravel.

EomGung Sur604 (normalizing by trace max.)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 18, R No.= 1 - 47



AMPLITUDE SPECTRUM FOR S DEPTH -18M(EL) (SUR604)
(S)BH8-(R)BH7,S NO.=18,R NO.=1-47,T.W.=10-50MS

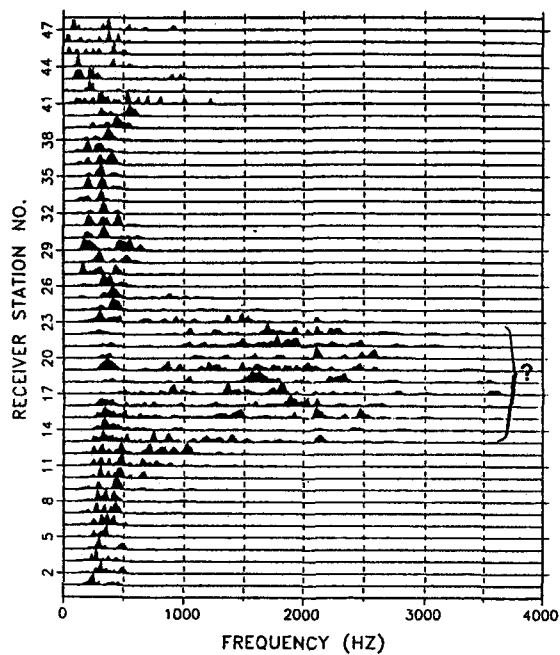
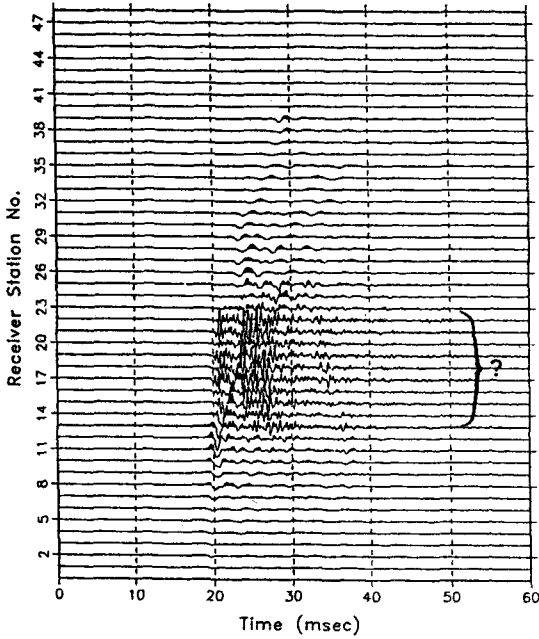


Fig. 5. Shown are shot gather 18 (left) and the corresponding frequency content (right). They are normalized by maximum amplitude of each trace (trace normalization). Relatively high frequency content of waves are clearly visible at the indicated interval.

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 18, R No.= 1 - 47



AMPLITUDE SPECTRUM FOR S DEPTH -18M(EL) (SUR604)
(S)BH8-(R)BH7,S NO.=18,R NO.=1-47,T.W.=10-50MS

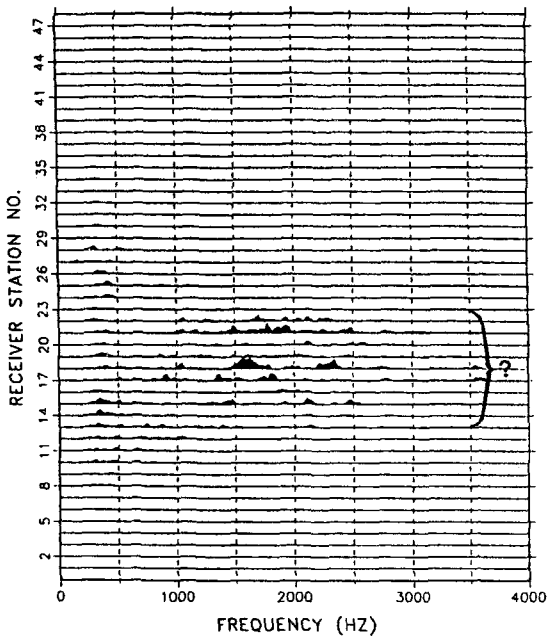


Fig. 6. Show are shot gather 18 (left) and the corresponding frequency content (right). They are normalized by maximum amplitude of total traces (file normalization). The high frequency content of waves are dominant in the seismograms.

대 진폭치를 기준(편의상 file normalization이라 함)으로 각 트레이스를 평준화한 결과를 나타내고 있다(이에 반하여 Fig. 5의 기록은 각 트레이스별로 그의 최대 진폭치에 의해

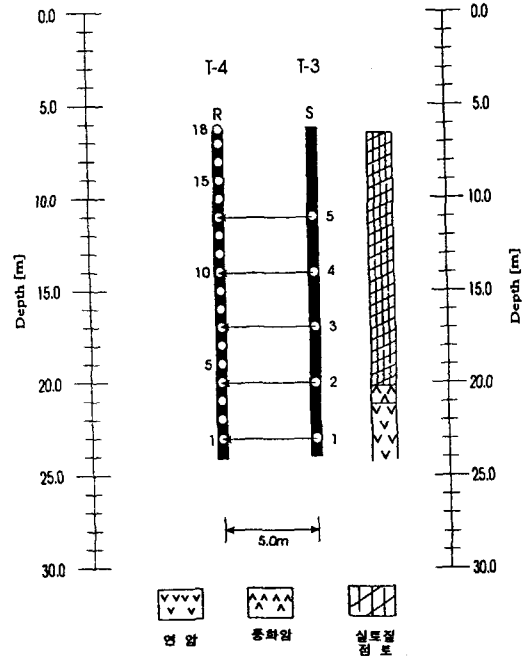
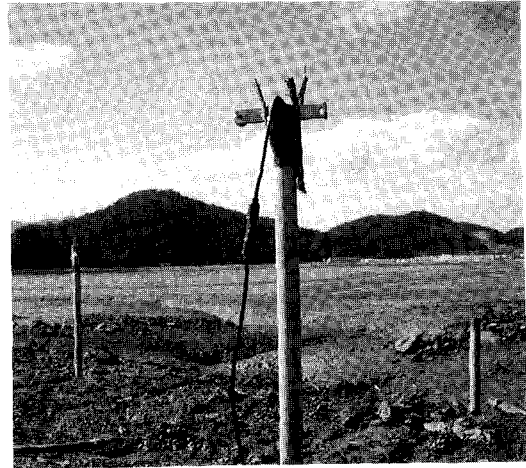


Fig. 7. Scene of reclamation work at seashore (upper part) and source-receiver geometry for crosshole seismic survey (lower part). Shot 3~5 are located within the silty mud layer and shot 1, 2 within the hard rock.

평준화된 결과(편의상 trace normalization이라 함)이다. 이들은 상대적으로 큰 진폭을 나타내고 있다. 미리 결론을 짓는다면, 이러한 특이한 탄성과 전달 현상(흡수성이 거의 없음)은 해성 실트질 점토(흔히 팽층이라고 함)에 의해 유래된 것이다. 즉, 이 지역의 지반 상태는 이전의 팽층위에 매립된 것으로 판단될 수 있다. 다음은 이러한 특이한 탄성과 전달 현상을 또 다른 현장 실험을 통하여 예시하고자 한다.

Fig. 7의 윗부분은 전라남도 여천군 울천면 일원에서 대규모 임해 매립단지를 조성하는 공사 현장을 나타내며 여기서 거의 팽층을 대상으로한 시추공간 탄성과 탐사가 수행되었다(그림의 아랫부분). Fig. 8에는 바로 수평파선에 대한 기록을

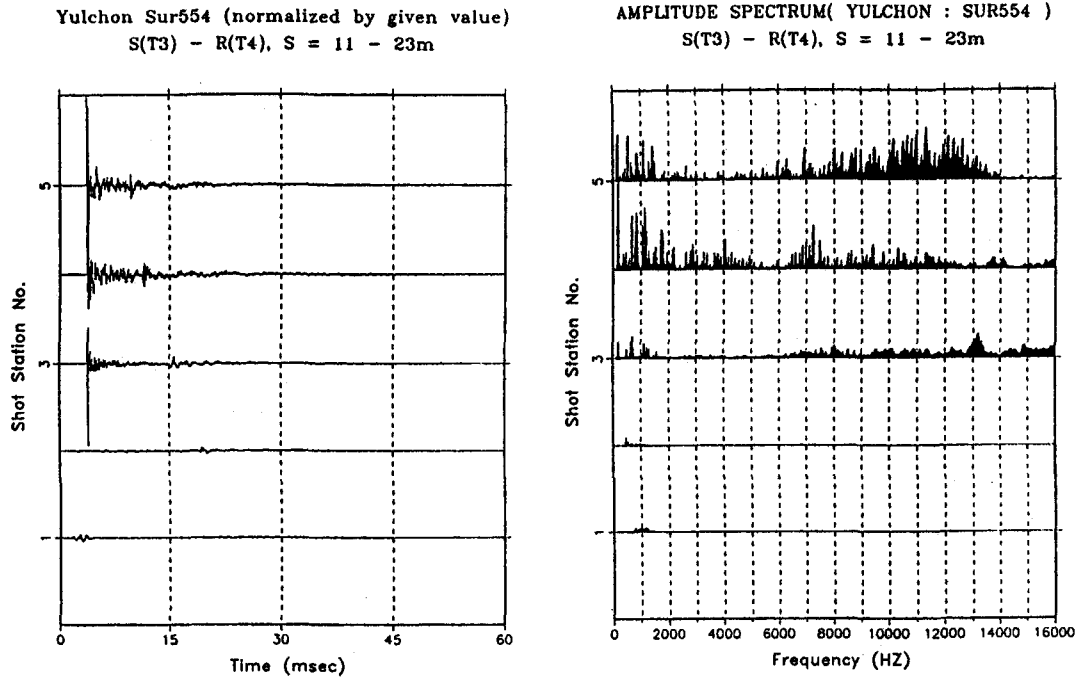


Fig. 8. Shown are the crosshole data according to the horizontal raypaths in Fig. 7 and the corresponding frequency content. The amplitudes of seismic arrivals can be compared due to the file normalization. It would seem that the silty mud will not attenuate the seismic waves.

그들의 주파수 내용과 상호 대조하고 있다. 일별하여, 빨층내에 전달된 탄성파(상부 세 개의 트레이스)는 주파수 16 kHz에 이르기까지 에너지가 보존되고 있는 반면 경암내에 전달된 탄성파는 불과 2 kHz 이내의 진폭을 보여주고 있다. 일반

적으로 경암에 전달되는 탄성파의 진폭 및 주파수는 풍화암과 비교하여 상대적으로 높다고는 하나 빨층과 비교하여서는

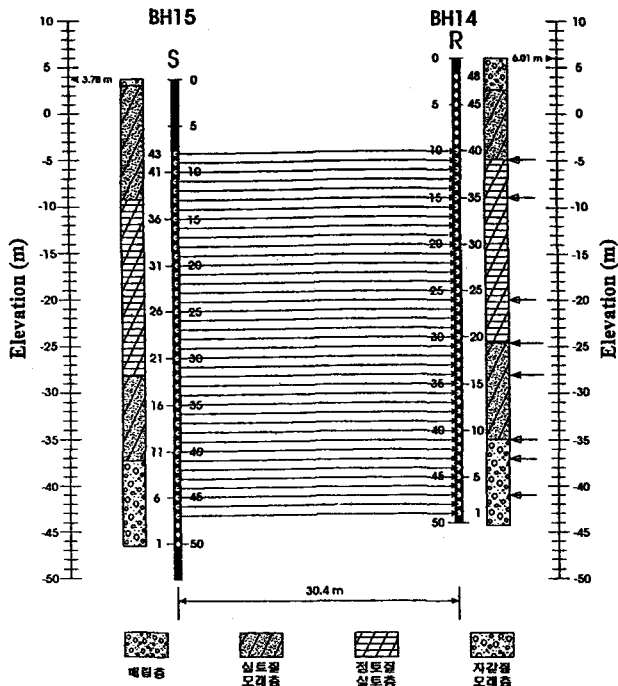


Fig. 9. Geometry of source and receiver array for seismic tomographic measurement at the survey site Pusan. Horizontal raypaths are depicted between boreholes.

EomGung tomography data (Survey No. 601)
S(BH15)-R(BH14), S No.= 4-43, R No.= 1-40

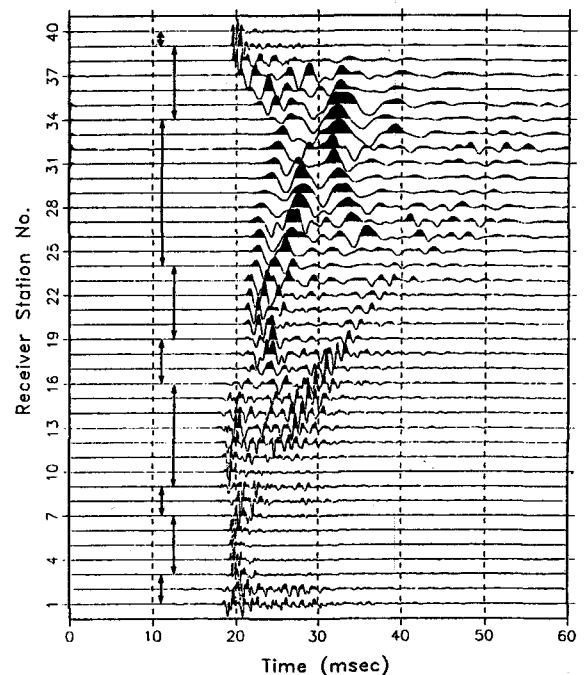


Fig. 10. Shown are the crosshole data according to the horizontal raypaths in Fig. 9. This strategy may be useful especially for detecting the layer boundary.

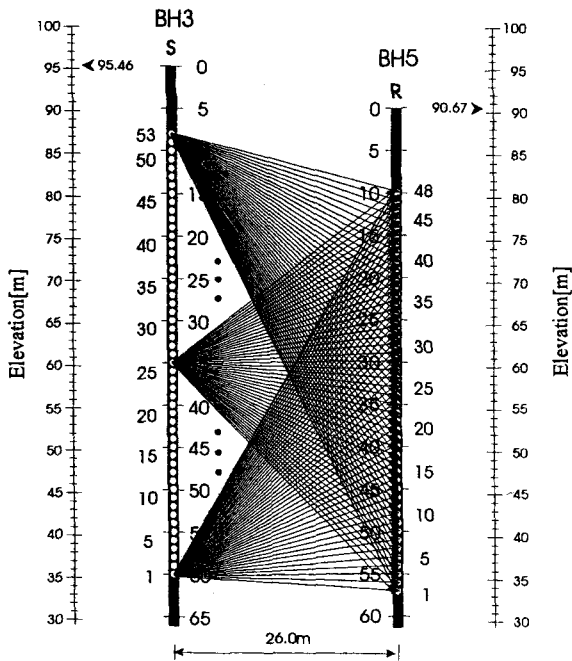


Fig. 11. Geometry of source and receiver array for seismic tomographic measurement at the survey site Taejon.

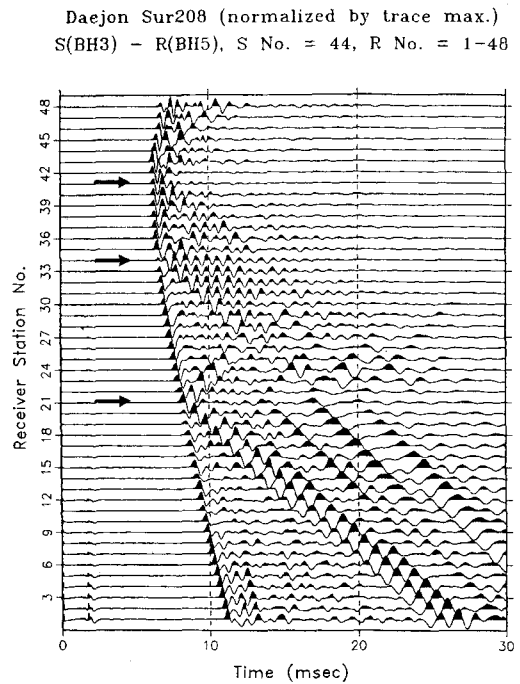


Fig. 12. Example of crosshole data (shot gather 44). Clearly seen are the tube waves at three receiver locations. Several V-patterns of tube waves at receiver station 21 indicate that the fracture should be elongated to some extent.

상대적으로 대단히 낮은 것이다. 이러한 뺨의 고유 특성은 당시 뺨층 내에 적재된 뼈력의 외형 경계면 규명을 위한 주요 단서가 되었다(Kim and Hyun, 1997).

측정 데이터 분석과정에서 결코 간과될 수 없는 유용한 기법은 단면 측정으로부터 수평 파선에 대한 탄성과 도달을 발췌하여 나타내는 것이다(Fig. 9 참조). 이것은 토목분야 지반조사의 시추공간 탄성과속도 측정(crosshole velocity test)와 대등한 것으로서 그로부터 시추공 주위 암층 경계는 쉽게 판단될 수 있으며 더구나 박층이 퇴적층일 경우는 더욱 그러하다. Fig. 10은 도달된 탄성과의 진폭, 주시 및 주파수 내용 변화에 따라 퇴적층 경계가 식별되고 있음을 예시하고 있다. 여기서 얻게되는 모든 정보(Fig. 9에서 화살표로 표시)는 향후 토모그램 해석에 효율적으로 반영될 수 있다.

다음은 단면측정 데이터 분석에 의해 절리(fracture)의 존재 및 위치를 규명하며 경우에 따라서는 절리의 연장 상태 내지 투수성도 추정할 수 있음을 예시하고자 한다. Fig. 11은 토모그래피 단면 측정 과정을 파선에 의해 나타내고 있으며 본 탐사의 목적은 지하공간 활용(대전 지역)을 위한 터널의 심도를 선정하는 데 있었다. Fig. 12는 발파점 기록 44를 나타내고 있다. 국내 경암을 대상으로 한 단면 측정에서 흔히 관찰될 수 있는 튜브파(tube wave)의 발달이 여기에도 뚜렷이 인식되고 있다. 전체적으로 튜브파는 크게 세 개의 심도(화살표로 표시)에서 관찰된다. 일반적으로 탄성과 단면 측정에서 상기 튜브파가 관찰되면 대부분의 경우 최하 10 mm 이상의 틈새(aperture)를 갖는 절리가 존재한다고 볼 수 있다. 이를 확인하기 위하여 Fig. 13에는 수진공에서 얻게 된 텔레뷰어 탐사결

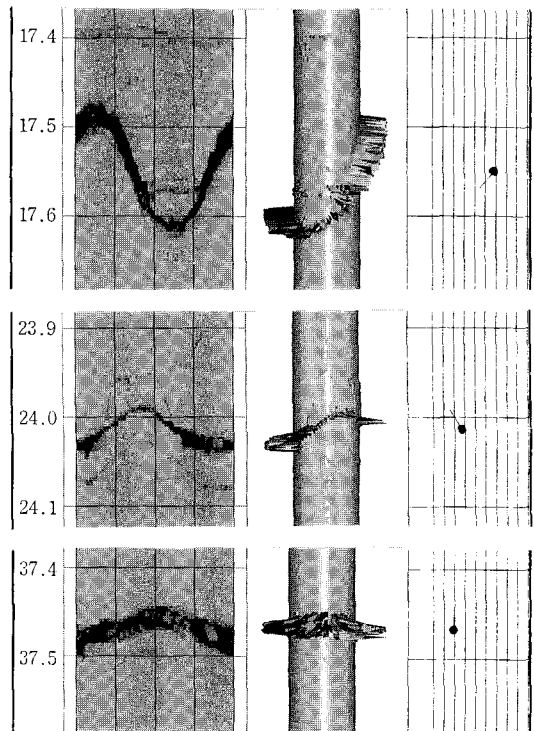


Fig. 13. Shown are the signatures of fractures from televueer measurements. From left to right, amplitude image, 3-D caliper log and arrow plot. Amplitude image was derived from the acoustic energy reflected from the borehole wall, 3-D caliper log from the traveltimes of the reflected waves. Arrow plot gives information about dip direction and dip angle.

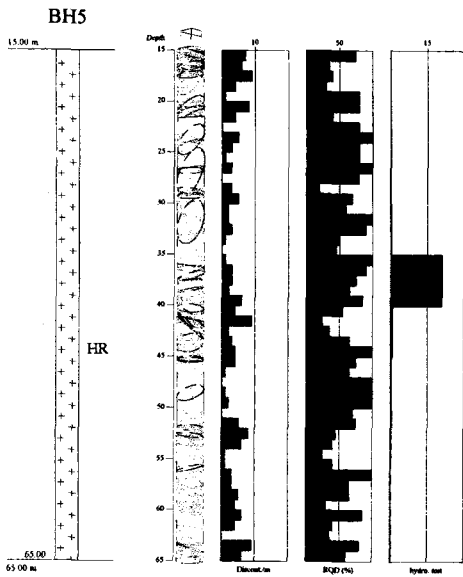


Fig. 14. Shown are the televiewer data of receiver borehole. From left to right, drill log, 3-D log of fractures, fracture density (fracture quantity per 1m), RQD (%) and Lugeon value (cm/sec).

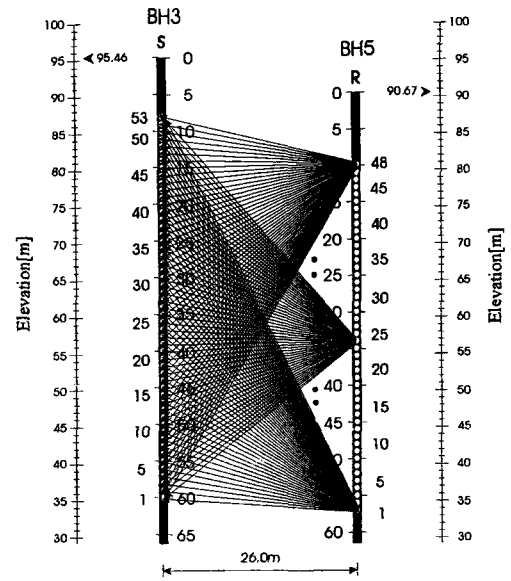


Fig. 15. Geometry of source and receiver array for seismic tomographic measurement.

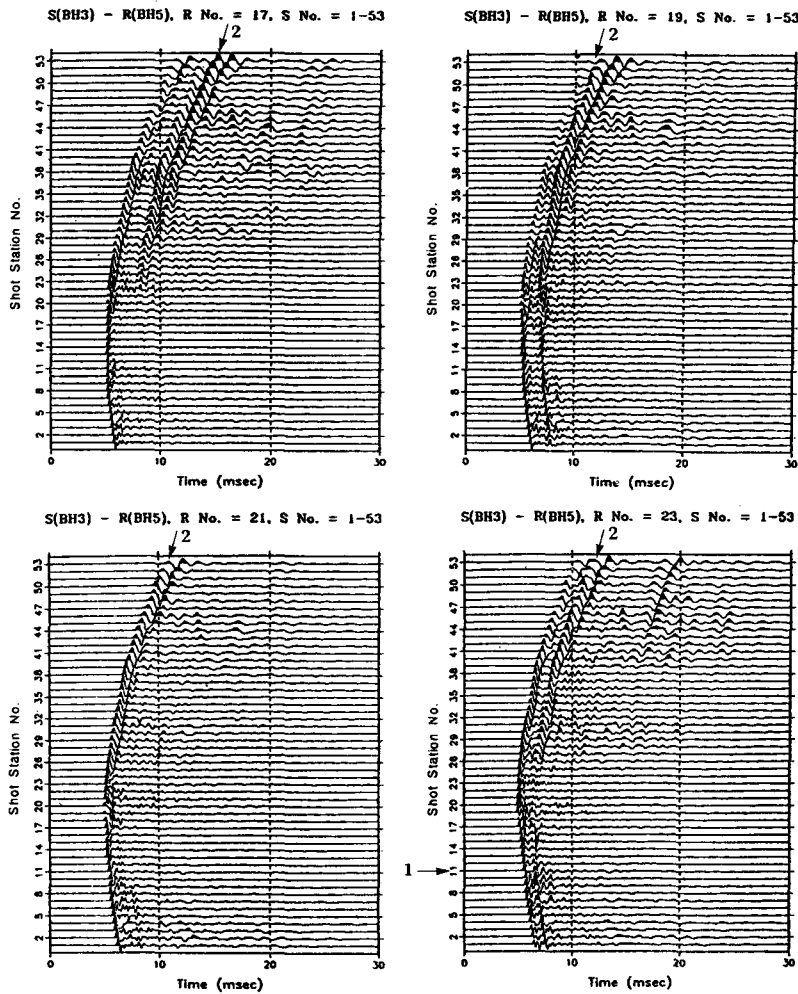


Fig. 16. Examples of crosshole data (shot gather 17, 19, 21 and 23). Arrow 1 indicates the tube wave conversion point within the source borehole. Arrow 2 shows the wave arrivals moving equidistantly in time. It was caused by tube waves.

과로부터 튜브파가 생성된 심도 주위를 발췌하여 상호 대별하고 있다. 그림의 왼쪽부분은 공벽으로부터 반사된 초음파의 진폭을 나타내고 있다(진폭 이미지). 여기서 어두운 색깔은 상대적으로 낮은 진폭치를 나타내며 다양한 형태의 sine 곡선은 바로 절리를 대변하게 되며 그들의 경사방향 및 경사각은 각각 sine 곡선의 최하단부 및 진폭으로 가늠된다(Kim et al., 1993). 각 절리의 틈새는 진폭이미지로부터 추정되며 그들 값은 각각 13.6 mm, 10.5 mm, 26.5 mm(위에서 아래로)이다. 그림의 중간부분은 소위 고분해능 텔레뷰어 공경점층 기능에 의해 표현된 소위 3D caliper log(자복을 바라다 보았을 경우)을 나타낸다. 시추공 내벽 상태가 시각적으로 훌륭하게 표현되고 있다. 여기서 열린 절리는 내벽이 터진 상태를 나타내고 있다. 그림의 세번째 부분은 상기 절리에 대한 경사방향 및 경사각을 표현하는 소위 arrow plot를 보여주고 있다. 수직선의 한칸은 경사각 10°에 해당되며 화살대 방향은 경사방향(azimuth)을 나타낸다. 상기 텔레뷰어 데이터 분석 결과는 바로 단면 측정에서 관찰된 튜브파의 생성과 직접적으로 연계되고 있음을 볼 수 있다. 특히 수신기 번호 21에 대응되는 튜브파는 또 다른 의미를 갖고 있다. 즉, 초동 주시로부터 일정 주시 후에 여러개의 새로운 튜브파가 발달되고 있다는 것으로서 이는 절리의 연장 상태를 가늠할 수 있는 척도가 되는 것이다. 이를 확인하기 위하여 Fig. 14에는 수압실험 결과(Lugeon value)를 나타내고 있다(그림의 우측부분). 그림의 두 번째 부분은 절리면을 입체화(3D log)한 것이며 세 번째 그림은 1 m당 절리수(절리 밀도)를, 네 번째 그림은 RQD

값을 나타내고 있다. 기대한 바 상기 지적인 튜브파의 발달 상태는 바로 절리가 연장되고 있음을 의미하여 그로 인해 높은 투수성(Lugeon value)을 초래하였다고 볼 수 있는 것이다.

지금까지 예시한 발파점 기록은 실제 측정하는 과정을 그대로 반영한 것이다. 즉, 하나의 발생원으로부터 사방으로 전달된 탄성파를 48개의 수신기에 동시에 기록한 것이다. 이에 반해 Fig. 15는 모든 발파점 기록을 바탕으로 하나의 수신기에 모든 발생원의 탄성파가 도달되도록 재배열하는 과정을 파선으로 나타내고 있다. 이를 편의상 수신점 기록(receiver gather)이라고 한다. Fig. 16은 그 중 수신점 기록 17, 19, 21 및 23을 보여주고 있다. 여기에는 크게 두가지 정보를 제시하고 있다. 그 하나는 발생원 번호 11 위치(화살표 1로 표시)에서 미약하나마 튜브파의 발달이 인식되고 있다는 데 있으며 이는 바로 발생원 시추공의 그 심도에 절리가 존재하고 있음을 시사하는 것이 된다. 또 다른 하나는 수신기 위치를 달리

Geometry for Yoncheon tunnel survey

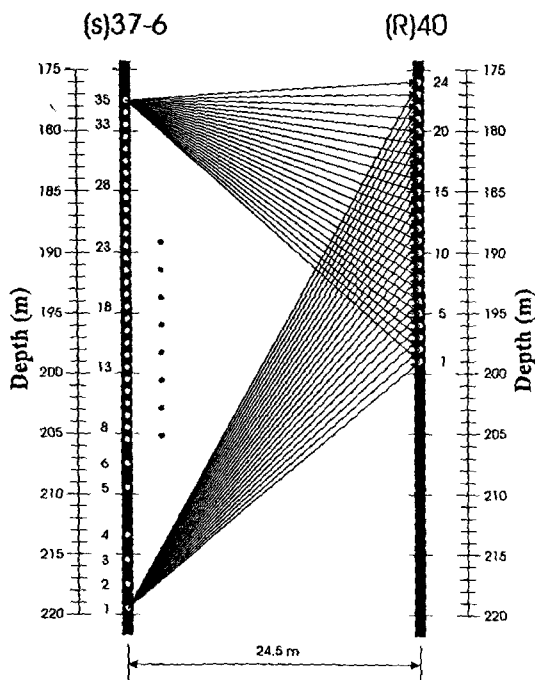
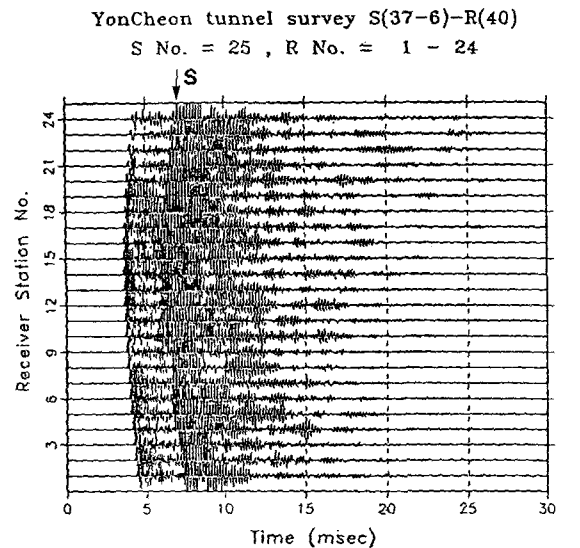


Fig. 17. Geometry of source and receiver array for seismic tomographic measurement at the survey site Yoncheon.



AMPLITUDE SPECTRUM (YONCHEON SUR433)
(S)37-6-(R)40 S NO.=25,R NO.=1-24 T.W.=0-10MS

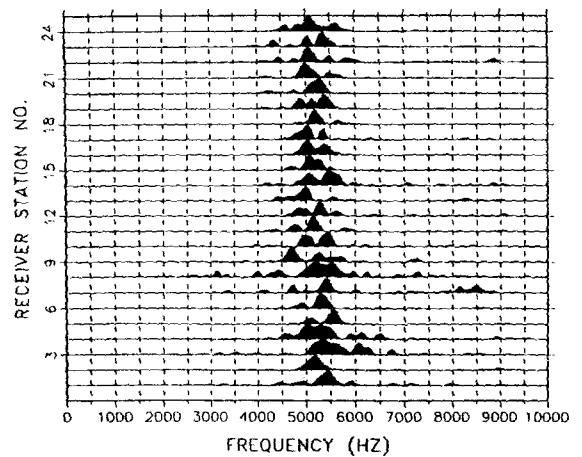


Fig. 18. Example of crosshole data (shot gather 25) and the corresponding frequency content.

함에 따라 초동주시 곡선과 거의 평행하게 관찰되는 탄성파 도달(화살표 2로 표시)이 일정 주시간격으로 이동되어 수신점 기록 21에서 그들은 거의 중첩되고 있다는 것이다. 이에 대한 탄성파 진행 경로는 모든 발생원으로부터 수신 시추공에서 이미 밝혀진 바 있는 절리(심도 약 37 m)에 모두 도달한 탄성파가 시추공을 따라 각 수신기에 도달된 것으로 볼 수 있다. 이로 인하여 수신 시추공의 절리 존재는 상기 분석에 의해 재확인되고 있는 것이다.

Fig. 17은 경기도 연천지역에서 터널 탐지를 위해 시도된 단면측정 과정 중 일부를 보여주고 있다. 이 지역의 암반 상태를 관찰하기 위하여 Fig. 18에는 발파점 기록 25와 그에 따른 주파수 내용을 나타내고 있다. 전달된 탄성파는 극경암에 해당되는 고주파수(약 5000 Hz)를 띠고 있음과 동시에 그들은

좁은 주파수 영역에 분포되고 있다. 또한 S파의 도달도 뚜렷이 관찰되고 있음에 비추어 암반은 거의 균질하다고 볼 수 있다. Fig. 19는 발파점 기록 8, 10, 12, 14를 차례로 나타내고 있다. 여기에는 Fig. 16에서 예시한 것과 유사한 탄성파의 도달이 뚜렷하게 관찰되고 있으며(화살표로 표시) 그들은 발생원 위치가 달리함에 따라 균등한 주시 간격으로 이동되어 발생원 번호 14(심도 약 198 m) 기록에서 초동과 거의 중첩되고 있다. 따라서 심도 약 198 m 주위에 큰 절리가 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 20에는 이전의 측정 단면(Fig. 17 참조)으로부터 불과 약 30 m 떨어진 곳에서 수행한 단면 측정 과정 중 일부를 나타내고 있다. Fig. 21는 발파점 기록 17, 12 및 7을 보여주고 있다. 이번에는 튜브파의 발달이 뚜렷하게 관찰되고 있으며

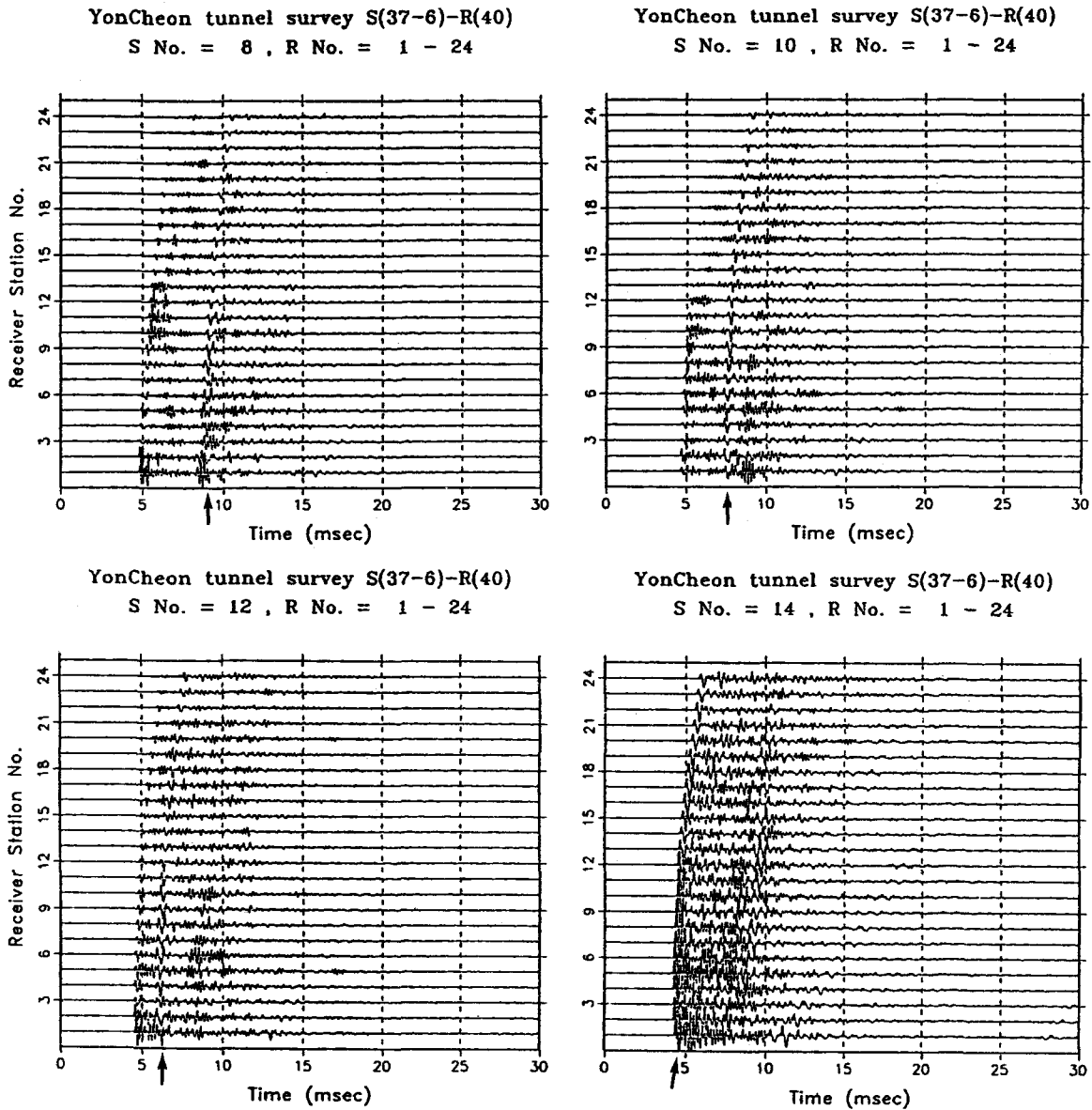


Fig. 19. Example of crosshole data (shot 8, 10, 12 and 14). The wave arrivals indicated by arrows move equidistantly in time. It was caused by tube waves.

Geometry for Yoncheon tunnel survey

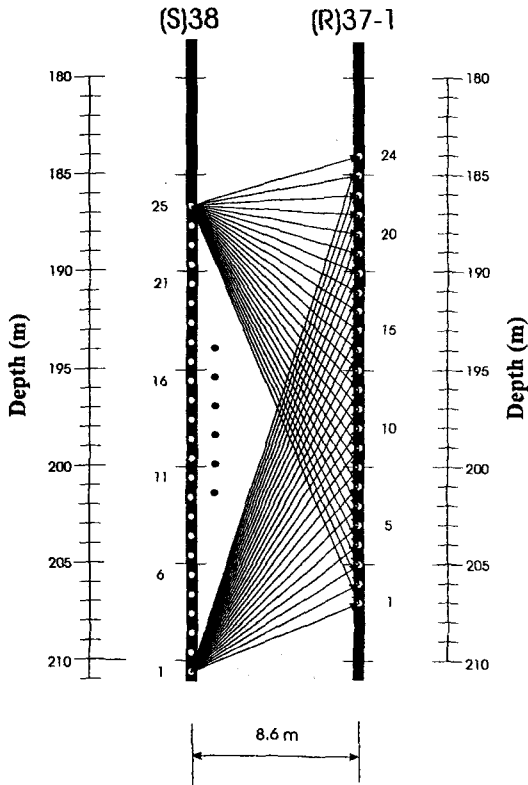


Fig. 20. Geometry of source and receiver array for seismic tomographic measurement at the survey site Yoncheon.

또한 그들이 발생원 위치가 달라짐에 따라 균등한 주시 간격으로 이동되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 점에 비추어 두 개의 시추공은 거의 인접하면서 그들간은 상호 절리에 의해 관통된 것으로 판단된다. 즉 발파점 기록 7에서는 거의 P 및 S 직접파에 준하는 탄성과 도달이 관찰되고 있다. 따라서 두 개의 시추공은 발생원 번호 7 위치와 수신기 번호 6번 위치에서 가장 인접하며 또한 상호 교차되고 있는 것으로 판단된다. 이러한 경우 토모그래피를 위한 단면측정은 그 의미를 상실하게 되는 것이다.

결론

탄성과 토모그래피가 실효성을 거두기 위해서는 무엇보다도 폭 넓은 주파수 대역을 갖는 탄성파를 발생하고 또한 수신할 수 있을 뿐만 아니라 탐사 경제성이 높은 측정시스템 개발이 전제 조건이 된다. 본 논문에서 예시된 단면 측정 데이터는 바로 상기 조건에 부합되는 것이라 할 수 있으며 이에 대한 독자적인 측정 및 전산처리 시스템은 현재 국내에서 널리 보급되어 활용되고 있다.

지표에서 두 개의 시추공을 이용한 국내 탄성과 토모그래피 응용에는 발생원-수신기 배열 구간의 일반적인 제약이외

Yoncheon tunnel survey S(38)-R(37-1)

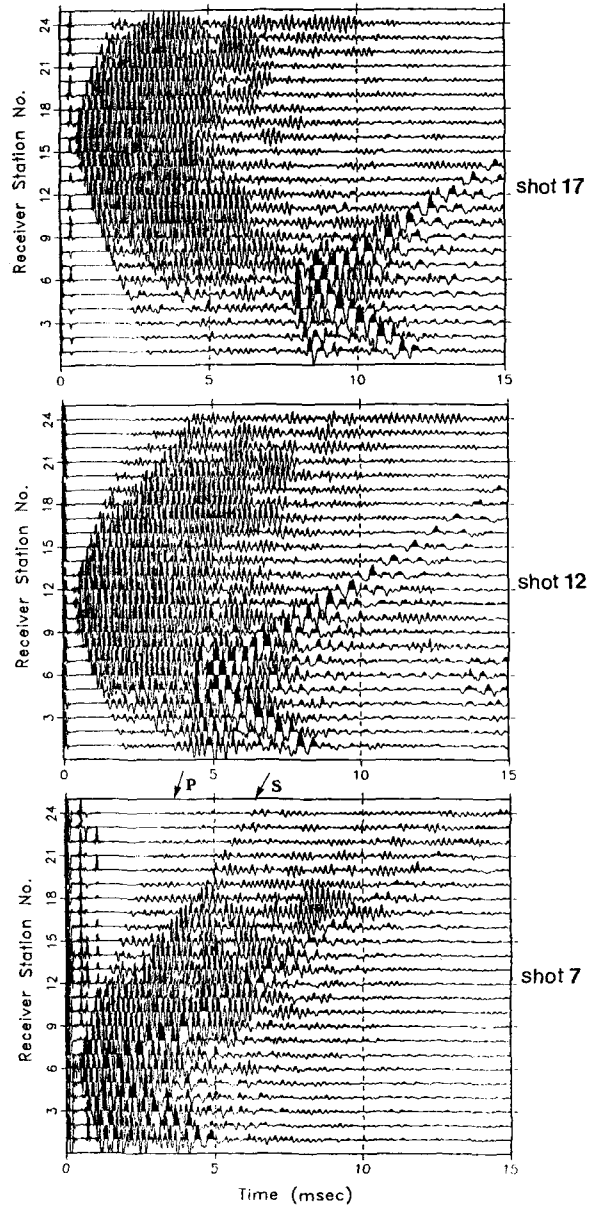


Fig. 21. Examples of crosshole data (shot gather 17, 12 and 7). The arrivals of tube waves move equidistantly in time. It would seem that the two boreholes are connected by fracture zone.

에도 각 암층 간의 탄성과 속도차가 상대적으로 대단히 크고 동시 암층 경계면이 거의 일관성을 잃고 있다는 문제점이 부가되고 있다. 이러한 문제는 비록 양질의 데이터와 적절한 역산기법이 주어진다 하더라도 흔히 주어진 지질 상태와 전혀 부합될 수 없는 결과를 초래할 수 있는 것이다. 따라서, 소기의 탐사 결과를 얻기 위해서는 무엇보다도 측정 데이터 그 자체에 대한 포괄적인 분석이 요구되며 그로 인한 풍부한 정보는 역산 과정 내지 토모그램 해석에 반영됨이 바람직하다. 본 논문에는 다양한 국내 현장응용 사례를 통하여 우선 ① 국내 특이한 지질구조로 인하여 흔히 오류를 범할 수 있는 초동식

별, ② 튜브파 발달과 절리와의 연계성, ③ 해성 실트질 점토(빨)에서의 특이한 탄성과 전달 상태, ④ 수신점 기록(receiver gather)의 응용성, ⑤ 수평 파선 기록의 유용성에 대해 서술하고 있으며 나아가서 그로 인한 다양한 정보는 지반 상태에 대한 보다 정확한 판단을 이끌 수 있다는 것을 보여주고 있다.

참고문헌

1. 김중열, 현혜자, 김기석, 김유성, 성낙훈, 1991, Geotomography에 의한 암반구조 연구(I): 한국동력자원연구소, 과학기술처, KR-91(T)-13.
2. 김중열, 장현삼, 김유성, 현혜자, 김기석, 1993, Geotomography에 의한 암반구조 연구(II): 한국자원연구소, 과학기술처, KR-93(T)-1.
3. 김중열, 김유성, 현혜자, 김기석, 1994, 갯내 지오토모그래피에 의한 탄층 연속성 조사: 한국자원공학회지, 31, 413-418.
4. 김중열, 현혜자, 김기석, 김유성, 1994, 시추공 횡파 발생원 개발 및 그 응용성: 한국자원공학회지, 31, 502-508.
5. 김중열, Schepers, R., 1995, 고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능: 대한지질공학회지, 5, 277-288.
6. 김중열, 김유성, 현혜자, 1995, Geotomography에 의한 암반구조 연구(III): 한국자원연구소, 과학기술처, KR-95(T)-17.
7. 김중열, Raekers, E., 손무열, 1997, 탄성과 토모그래피탐사 효율성 극대화를 위한 다중 발파시스템 개발: 한국자원공학회지, 34, 559-564.
8. 김중열, 현혜자, 1997, 울촌 제1지방산단 조성공사를 위한 지반조사: 한국자원연구소, 현대건설(주).
9. 김학수, 1994, 변형된 Born 근사를 이용한 회절 지오토모그래피에 관한 연구: 서울대학교, 박사학위논문.
10. 박관호, 1997, 영상화 연산자를 이용한 탄성파자료 해석: 서울대학교, 박사학위논문.
11. 송영수, 1990, 회절 지오토모그래피를 이용한 영상 구성에 관한 연구: 서울대학교, 박사학위논문.
12. 윤왕중, 1991, 대수적 영상 재구성법에 의한 탄성과 지오토모그래피의 연구: 서울대학교, 박사학위논문.
13. 임해룡, 1992, Fermat 원리 및 수정된 파선경로를 이용한 비선형 파선토모그래피 연구: 서울대학교, 박사학위논문.
14. 장성형, 양승진, 황세호, 김중열, 1993, 횡적등방성 지층의 시추공 간 탄성과 주시 자료의 토모그래피 역산 연구: 대한지질공학회지, 3, 231-239.
15. 조철현, 1992, 주파수영역에서 가중평균 차분연산자를 이용한 파동방정식 모델링: 서울대학교, 박사학위논문.
16. Kim, J. Y., Kim, Y. S. and Hyun H. J., 1996, Underground Survey for the Foundation of Great Bridge Tower by Televiwer and Seismic Tomography: Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, 243-253.