

시추공 레이더 탐사에 의한 지하 터널 탐지 적용성 연구

조성준^{1*} · 김정호¹ · 김창렬¹ · 손정술¹ · 성낙훈¹

한국지질자원연구원 지반탐사연구실

Application of Borehole Radar to Tunnel Detection

Seong-Jun Cho^{1*}, Jung-Ho Kim¹, Changryol Kim¹, Jeong-Sul Son¹ and Nak-Hun Sung¹

Engineering Geophysics Group, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

요약: 이 연구에서는 다양한 시추공 레이더 탐사법 중, 지하 갱도의 탐지에 사용이 가능한 ① 시추공 레이더 반사법 탐사, ② 방향성 안테나를 이용한 반사법 탐사, ③ 크로스홀 스캐닝(crosshole scanning), ④ 레이더 토모그래피 등의 4종류 시추공 레이더 탐사법의 터널 탐지에 대한 적용성과 한계성을 탐사 사례 분석을 통해 고찰하였다. 시추공 레이더 반사법 탐사의 터널로부터 회절 양상은 완벽한 포물선 형태보다는 상부 포물선만 명확히 나타난 형태가 많았고 그 회절 이벤트는 정점을 기준으로 아래, 위 10 m 이상에 이르는 트레이스 까지 나타났다. 또한 안테나의 길이에 비해 시추공의 공경이 커지면 링잉 현상이 많이 발생함을 확인하였다. 송·수신 거리(offset)에 따라 신호의 양상이 많이 달라지며 현장여건에 따라 송·수신 거리를 조절하면 더 좋은 분해능의 자료를 획득할 수 있을 것이다. 방향성 안테나 시스템은 한 시추공만을 이용하여 터널의 3차원적인 위치를 정확히 판별할 수 있는 장점이 있으나 장비의 가격이 고가이며, 현장 작업의 난이도가 매우 높고, 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 크로스홀 스캐닝은 터널의 유무에 대한 좋은 지표가 될 수 있음을 알 수 있었으며 시추공 레이더 반사법 탐사와 같이 사용된다면 높은 신뢰도의 결과를 낼 수 있을 것이다. 레이더 토모그래피는 터널을 영상화함과 동시에 주변의 지반 물성을 얻게 되어 지하구조 파악에 효과적이라고 할 수 있다. 위의 결과를 토대로 경제적이고 효과적인 터널 탐지 방법을 제안하면, 먼저 시추공 레이더 반사법 탐사를 수행하여 이상 징후를 탐지 한 후, 주변의 시추공 상황에 따라 크로스홀 스캐닝이나 방향탐지 안테나를 도입하여 확인하는 것이다.

주요어: 터널탐지, 시추공 레이더 반사법, 레이더 토모그래피, 크로스홀 스캐닝, 방향성 안테나

Abstract: The borehole radar methods used to tunnel detection are mainly classified into borehole radar reflection, directional antenna, crosshole scanning, and radar tomography methods. In this study, we have investigated the feasibility and limitation of each method to tunnel detection through case studies. In the borehole radar reflection data, there were much more clear diffraction signals of the upper wings than lower wings of the hyperbolas reflected from the tunnel, and their upper and lower wings were spreaded out to more than 10m higher and lower traces from the peaks of the hyperbolas. As the ratio of borehole diameter to antenna length increases, the ringing gets stronger on the data due to the increase in the impedance mismatching between antennas and water in the boreholes. It is also found that the reflection signals from the tunnel could be enhanced using the optimal offset distance between transmitter and receiver antennas. Nevertheless, the borehole radar reflection data could not provide directional information of the reflectors in the subsurface. Direction finding antenna system had a advantage to take a three dimensional location of a tunnel with only one borehole survey even though the cost is still very high and it required very high expertise. The data from crosshole scanning could be a good indicator for tunnel detection and it could give more reliable result when the borehole radar reflection survey is carried out together. The images of the subsurface also can be reconstructed using travel time tomography which could provide the physical property of the medium and would be effective for imaging the underground structure such as tunnels. Based on the results described above, we suggest a cost-effective field procedure for detection of a tunnel using borehole radar techniques; borehole radar reflection survey using dipole antenna can firstly be applied to pick up anomalous regions within the borehole, and crosshole scanning or reflection survey using directional antenna can then be applied only to the anomalous regions to detect the tunnel.

Keywords: tunnel detection, borehole radar reflection, radar tomography, crosshole scanning, directional antenna

2006년 10월 20일 접수; 2006년 11월 23일 채택

*Corresponding author

E-mail: mac@rock25t.kigam.re.kr

Address: Engineering Geophysics Group,

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,

30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

서 론

산업화에 기반한 도심지의 급속한 팽창으로 인해 과거에 광산지역이었던 곳이 주거지역으로 바뀌고 있다. 이러한 폐광산 지역에서 지하 갱도나 채굴적에 의한 지반침하 문제나 상부 건축 구조물의 안정성 등이 중요한 문제로 대두되고 있다(권광수 등, 2000; Kim *et al.*, 2005). 또한 대형 교각의 시공이나 국토 안전의 차원에서 미확인 갱도나 터널의 탐지는 중요하다.

시추공 레이더 탐사는 지하구조 정밀 영상화를 위한 중요한 탐사 기술로 파쇄대의 탐지(설순지 등, 2001), 석회암 지역 내 공동 탐지(Kim *et al.*, 2004a), 고고학 조사(Zhou and Sato, 2000) 등에 적용되고 있으며, 시추공간(試錐孔間) 탐사를 이용한 터널 탐지에 관한 연구(Choi and Ra, 1999; Zhou and Sato, 2004) 등도 발표된 바 있다.

이 연구에서는 지하갱도 또는 미확인 터널의 탐지를 목적으로 수행한 시추공 레이더 탐사 사례를 통하여, ① 시추공 레이더 반사법 탐사, ② 방향성 안테나를 이용한 반사법 탐사, ③ 크로스홀 스캐닝(crosshole scanning), ④ 레이더 토모그래피의 4 종류 시추공 레이더 탐사법의 터널 탐지에 대한 적용성과 한계를 고찰하고자 한다. 시추공 레이더 반사법 탐사방법 중 쌍극자 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사를 통해 터널로부터의 전형적인 회절 형태와 다양한 매질에서의 투과 특성, 시추공 공경과의 관계 등에 대해 살펴보고자 했으며, 방향 탐지 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사를 이용해 단일 시추공을 이용한 지하 터널의 정확한 위치 추정 가능성을 확인하고자 하였다. 레이더 토모그래피를 통해서도 터널의 정확한 위치와 주변 매질의 물성 정보를 영상화 하는데 목적을 두었다. 한편 크로스홀 스캐닝은 특히 공기로 충전된 터널의 존재 여부를 판단하는데 매우 유용한 방법으로 현장 실험을 통해 그 적용성을 확인하고자 하였다.

이 논문에서는 연구에 사용된 각각의 시추공 레이더 탐사 방법을 소개하고, 현장 실험 장소에 대해 개괄적으로 설명한 후, 개별 탐사방법 별로 결과 및 토의를 기술한 후 종합적인 결론을 도출한다.

각종 시추공 레이더 탐사의 개요

이 연구에서 시험한 4 종류의 시추공 레이더 탐사에는 스웨덴 Malå Geoscience사의 RAMAC/Borehole 시스템을 사용하였다. 이 장비는 시간영역에서의 탐사 장비로 매우 빠른 시간에 자료를 획득하는 장점이 있으나 원리상 정확한 급전시각을 알 수 없는 단점이 있다.

시추공 반사법 탐사는 Fig. 1(a)에서와 같이 송신 안테나와 수신 안테나의 간격을 일정하게 고정시킨 후 단일 시추공에 삽입하여 심도별로 자료를 얻는다. 측정되는 자료는 주변으로부터의 반사 이벤트들로 자료획득 후 지표레이더 탐사와 유사

한 자료처리 과정을 거쳐 지하구조를 영상화 한다. 반사법 탐사의 자료처리는 본 연구팀이 개발한 RADPRO for Windows를 사용하였으며 자료처리 과정은 설순지 등(2001)에 자세히 기술되어 있다.

이 탐사법에서 사용하는 안테나는 무지향성의 쌍극자 안테나와 방향성 안테나로 구분할 수 있다. 시추공 레이더 탐사에서 가장 많이 사용하는 안테나는 쌍극자 안테나이며, 통상적인 시추공 레이더 반사법 탐사는 바로 쌍극자 안테나를 사용하는 탐사를 지칭한다. 이 연구에서는 쌍극자 안테나를 사용한 반사법 탐사에는 중심 주파수가 100 MHz와 250 MHz인 두 종류의 쌍극자 안테나를 이용하였다. 쌍극자 안테나는 에너지의 복사 효율이 좋으므로 측정자료의 신호대 잡음비(S/N 비)가 높다는 장점이 있다. 그러나 쌍극자 안테나는 안테나 중심축에 직교하는 평면상에서 볼 때에 무지향성이므로, 반사체의 심도와 시추공으로부터의 거리에 대한 정보는 얻을 수 있으나 방향에 대한 정보의 획득은 불가능하다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 개발된 안테나가 방향성 안테나(directional antenna)이다. Ebihara (2004) 및 Takayama and Sato (2006)은 광전계 센서를 이용한 방향성 안테나를 개발한 바 있다. 이 연구에서는 스웨덴 Malå Geoscience가 개발하여 상용화한 중심 주파수 60 MHz의 방향성 안테나 시스템을 사용하였다. 이 안테나 시스템은 송신 안테나로 쌍극자 안테나를 사용하고, 수신 안테나로 4 개의 로드 안테나(rod antenna)를 조합한 프레임 안테나를 사용한다(Fig. 1(b)). 수신 안테나에 감지된 4 개의 신호로부터 루프 안테나 신호를 합성한 후, 3 성분 자력계와 3 성분 중력 가속도계에 의해 얻어진 안테나 방향 자료를 이용하여 시추공 주변 360 전체 방향으로 부터의 신호를 방위각별로 분류해 낸다. 방향성 안테나를 채택한 시추공 레이더 반사법 탐사 자료의 처리 과정은 Kim *et al.* (1998)에 기술 되어 있다. 이 탐사 방법은 한 시추공에서의 탐사로 터널까지의 정확한 거리 및 방향 정보를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 기존의 시추공 레이더 반사법 탐사에 비해 시간이 많이 걸리며 S/N 비가 쌍극자 안테나를 사용한 경우보다 매우 낮다는 단점이 있다. 또한 반사 이벤트의 각 프레임 안테나 간의 거리에 따른 도달 차이가 반사 이벤트의 정확한 방향 정보를 측정하는데 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 안테나를 시추공의 중심에 위치시키는 것이 매우 중요하며, 특히 시추공 경이 큰 시추공에서는 특별히 고안된 센트럴라이저(centralizer)를 사용해야 하므로 현장 운용이 쉽지 않다는 단점이 있다.

Fig. 1(c)의 레이더 토모그래피는 두개의 시추공을 이용하여 하나의 시추공에는 송신 안테나를, 다른 시추공에는 수신 안테나를 위치시켜, 송·수신 안테나를 이동시키며 자료를 얻는다. 가장 중요한 측정변수인 신호위치(signal position)는 송, 수신 공간의 거리에 따라 가장 적절한 위치에서 직접과가 기록될 수 있도록 조정하였다. 또 다른 중요한 측정변수인 샘플링 주파수는 100 MHz 안테나를 사용할 때에 1 GHz 이상으로 설

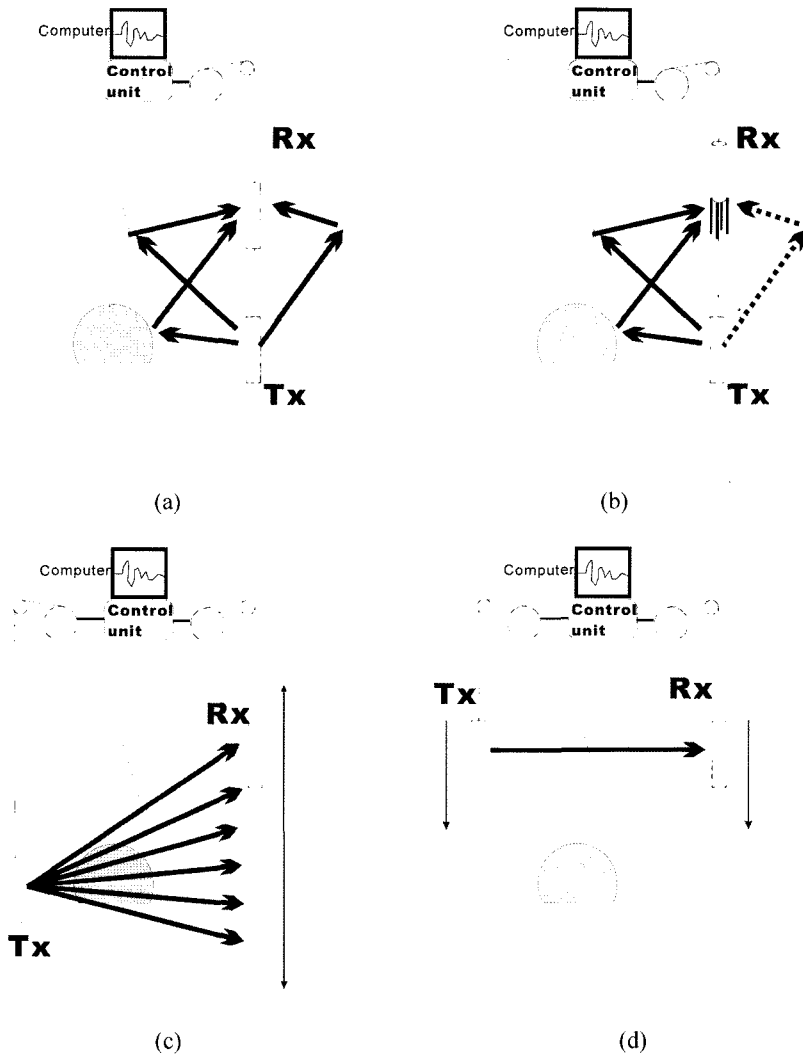


Fig. 1. Schematic descriptions of four different borehole radar methods; borehole radar reflection survey with dipole antenna (a), borehole reflection survey with directional antenna (b), radar tomography (c), and cross hole scanning (d).

정함으로서 정확한 초동 관측이 가능하도록 하였다. 발췌한 초기도달 주시를 입력자료로 하여 주시 토모그래피(traveltime tomography) 역산을 통해 시추공간의 전자기파 속도구조를 영상화 하였다. 초동 발췌, 역산, 영상의 구현 등의 모든 자료처리는 본 연구팀이 개발한 토모그래피 탐사 자료 처리 소프트웨어인 TOMORAD를 이용하였다.

Fig. 1(d)의 크로스홀 스캐닝은 두 개의 시추공을 이용하며 송, 수신 안테나를 서로 다른 시추공에 위치시켜 두 시추공 사이를 전파한 레이더 파를 이용한다는 점에서 토모그래피와 유사하다. 그러나 크로스홀 스캐닝에서는 동일한 심도에 송, 수신 안테나를 위치시켜 자료를 획득하므로 한 송신 심도에 한 개의 수신 자료를 획득한다는 점이 다르다. 수동으로 송·수신 안테나를 동일 심도로 위치시켜 측정하므로 반사법 탐사에 비해 인력과 측정시간이 많이 소요된다. 그러나 토모그래피보다는 측정시간이 덜 소요되므로 빠른 시간에 두 시추공 사이의 레이더 파 전파 특성에 대한 정보를 획득할 수 있다는 장

점이 있다. 이 연구에서는 터널에 의한 신호 형태의 파악이 목적이기 때문에 특별한 자료처리를 적용하지는 않았다.

실험 지역

이 연구의 현장 실험 장소는 3 지역이며 이를 편의상 A 지역, B 지역, C 지역으로 명명한다. A 지역은 경기도 북쪽의 화강암 지역에 위치한 지하 터널 탐지 시험장으로 표고 기준으로 75 m 심도에 터널이 위치하고 터널 주위에 6인치 시추공이 다수 존재하는 곳이다. Fig. 2에 A 지역의 터널 위치와 시추공 배치도가 표시되어 있다. T-8, T-1, T-7, T-6, DT-25, T-3 시추공에서 100 MHz와 250 MHz 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사를 수행 하였으며, 터널을 사이에 둔 DT-25와 T-3 시추공에서 레이더 토모그래피와 크로스홀 스캐닝을 실시하였다. 또한 T-8 시추공에서 방향성 안테나 시스템을 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사를 수행하였다.

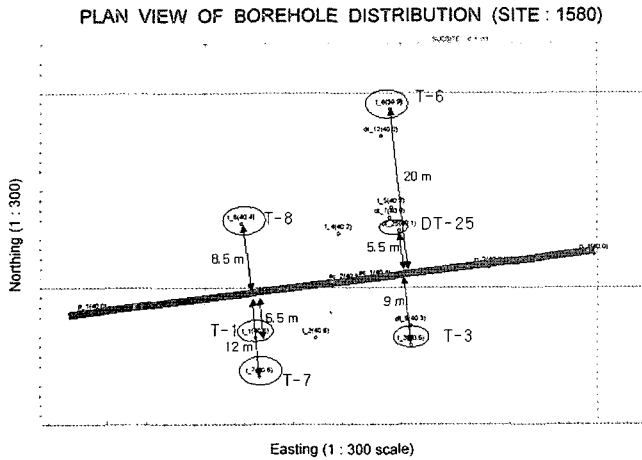


Fig. 2. Plan view of borehole distribution and tunnel location (a thick straight line) of the site A.

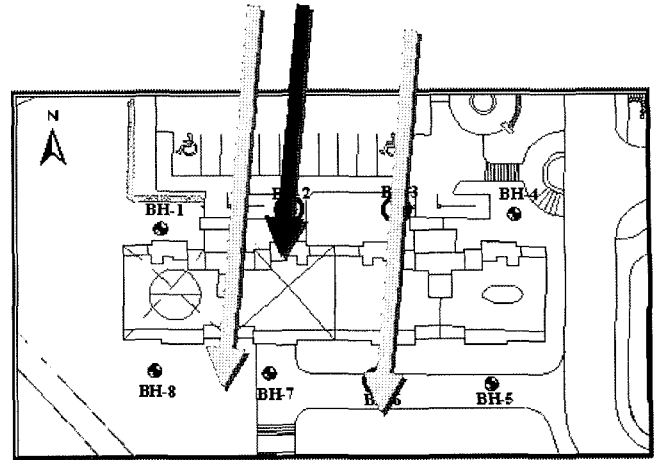


Fig. 4. Developing direction of galleries (arrows) estimated by various geophysical surveys and locations of boreholes at the site C.

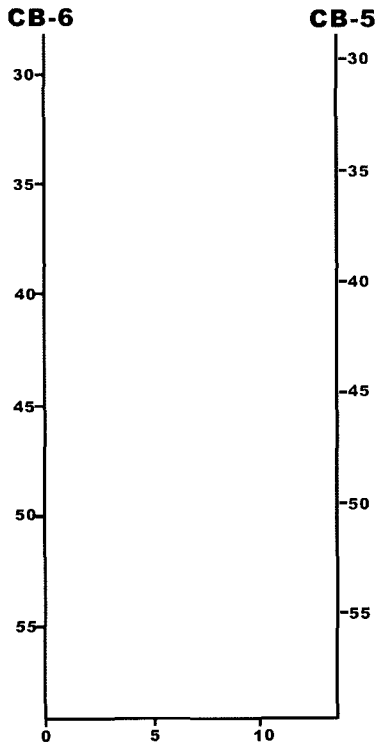


Fig. 3. Vertical location of the tunnel on the surveyed tomographic section at the site B.

B 지역은 폐 철광산지역으로 Fig. 3과 같이 CB-5와 CB-6 사이 지하 약 42 m 하부에 폐갱도가 존재하는 곳이다. 이 지역은 대형 교량의 교각을 설치하려는 곳으로 교각의 안정성 확보를 위해 폐갱도의 정확한 위치 파악이 매우 중요한 곳이다. 이 지역에서는 송수신 안테나 사이의 거리가 시추공 레이더 반사법 결과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 송수신 안테나 거리를 변화해 가면서 시추공 레이더 반사법 탐사를 수행하였다. 이와 아울러 레이더 토모그래피 탐사를 통해 정확한 갱도의 위치를 파악하고, 주변의 물성에 대한 정보를 확보하고

자 하였다.

C 지역은 연·아연 폐광산 지역으로, 폐갱도를 탐지하기 위해 8개의 시추공에서 시추공 레이더 반사법 탐사를 적용하였다. 이 지역은 25층 규모의 아파트가 건설된 곳으로 지하 채굴적 및 갱도에 의한 아파트의 안정성을 평가하기 위해 다양한 물리탐사 및 지반조사가 적용된 곳이다(Kim *et al.*, 2004b). Fig. 4에 아파트와 주변 8개의 시추공의 위치와 각종 탐사 및 시추를 통해 확인한 갱도의 진행 방향(화살표 참조)이 표시되어 있다.

쌍극자 안테나 시추공 반사법 탐사

A 지역의 6개 시추공에서 중심 주파수 100 MHz 및 250 MHz 두 종류의 쌍극자 안테나를 이용하여 시추공 반사법 레이더 탐사를 수행하여 터널에 대한 시추공 레이더 반사법 탐사 자료의 특징과 한계를 살펴보았다.

Fig. 5는 터널로부터 약 6.5 m 떨어진 시추공 T-1에서 100 MHz 안테나로 시추공 반사법 탐사를 수행하여 얻은 원시자료와 자료처리를 거친 후의 자료를 비교한 것이다. Fig. 5(a)의 원시자료에서는 심한 링잉 현상에 의해 신호가 많이 왜곡됨을 알 수 있으며, 파쇄대에 의한 반사 이벤트로 보이는 신호는 있으나 터널에 의한 회절 현상은 잘 보이지 않는다. 원시자료에 DC 제거, 이득보정, 주파수대역 필터링, NMO보정의 기본적인 자료처리를 거친 후 공간영역 필터링을 통해 시추공에 나타난 신호를 제거한 것이 Fig. 5(b)이다. 그림에 표시한 사각형의 내부에 터널 부존 심도인 75 m를 꼭지점으로 하는 포물선 형태의 매우 강한 회절파가 발달하고 있으며, 이는 심도 55 m 정도까지도 회절파를 인식할 수 있을 정도로 강하다. 자료처리를 적용하지 않은 Fig. 5(a)와 비교하면 적절한 자료처리가 필수적임을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 회절파는 포물선의 꼭지점을 기준으로 할 때에 상부 포물선만이 뚜렷하며 하부는 쉽게 확

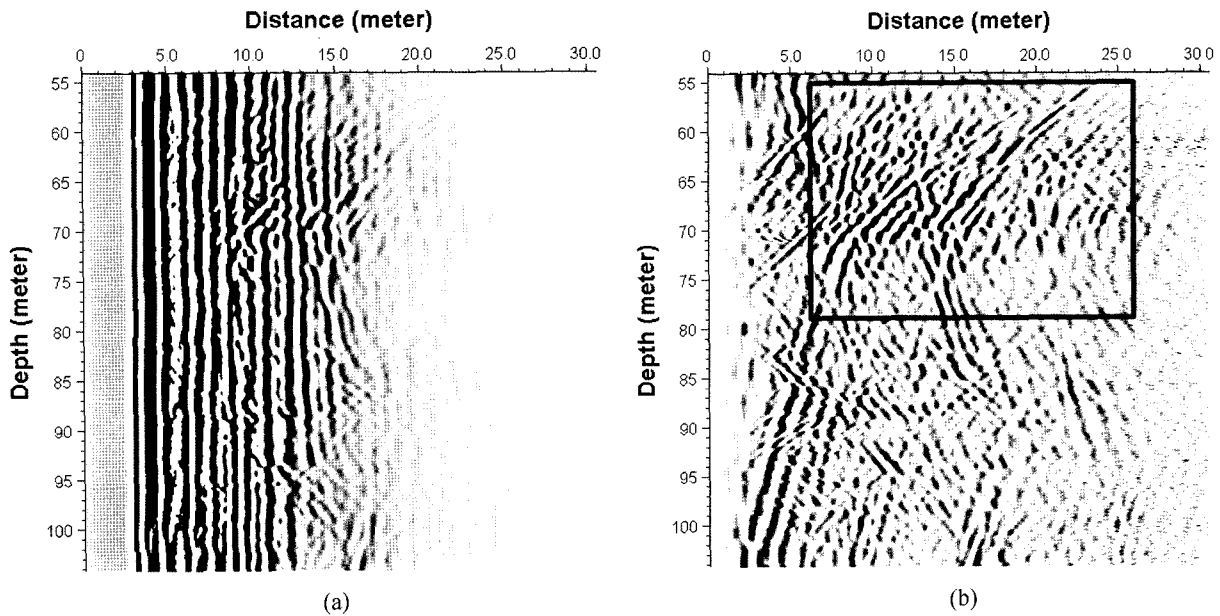


Fig. 5. Comparison of raw (a) and processed (b) images of borehole radar reflection data at the borehole T-1 of the site A.

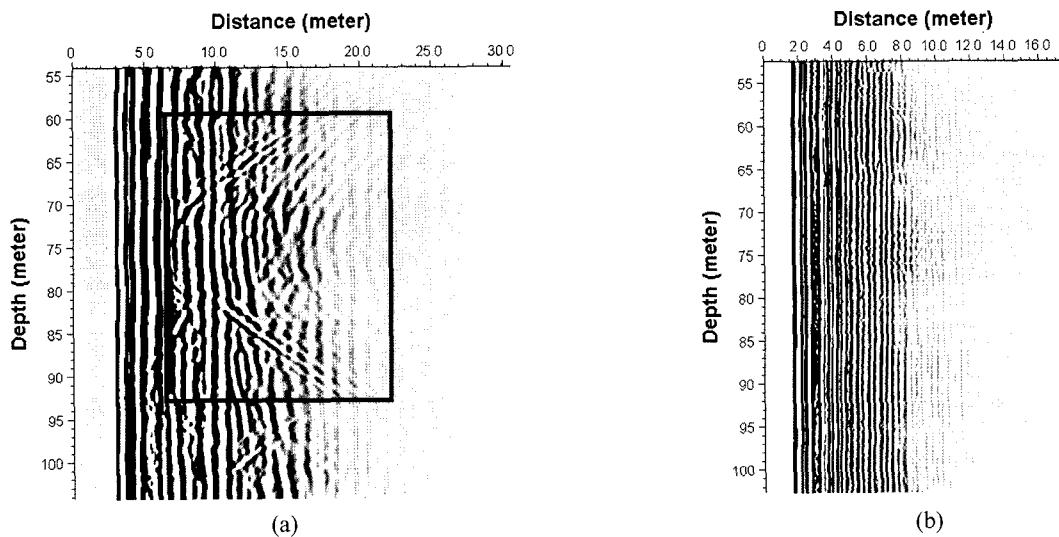


Fig. 6. Unprocessed data of borehole radar reflection surveys adopting dipole antennas having different central frequencies at the borehole DT-25 of the site A. (a) 100 MHz antenna. (b) 250 MHz antenna.

인이 어려울 정도로 매우 미약함이 특징적이다. 이러한 현상은 다른 지역의 시추공 반사법 탐사에서 유사하게 나타났다.

이의 원인을 살펴보기 위하여 터널을 사각형으로 모사한 경우와 실제 터널과 같이 터널의 천정은 곡선으로, 바닥 면은 직선으로 모사한 두 경우에 대한 수치 실험을 수행하였다. 그 결과, 사각형 공동 모형의 경우에는 이상적인 포물선 형태가 나타난 반면에, 실제 터널과 같은 모형에 대한 반응은 탐사결과와 유사하게 회절파가 포물선 꼭지점을 기준으로 하여 상부 회절파만이 강함을 확인할 수 있었다. 따라서 터널에 의한 회절파가 상부 포물선을 따라서는 강하며 하부에서는 약하게 나타나는 현상의 주원인은 터널 단면의 형태 때문이며, 나아가서

터널을 단순한 점 반사원으로 모사하기는 어려움을 알 수 있다. 이와 함께 시추공 안테나가 완벽한 쌍극자 안테나가 아니며 안테나 하부에 배터리 모듈이 부착되어 있기 때문에 나타나는 비대칭적인 방사패턴에 의한 영향 또한 무시할 수 없을 것으로 생각된다(Ellefsen and Wright, 2005).

Fig. 6은 시추공 DT-25에서 100 MHz 안테나를 이용한 반사법 탐사 원시자료(a)와 250 MHz 안테나를 이용한 반사법 탐사 원시자료(b)이며 터널은 약 75 m 심도에 시추공으로부터 5.5 m 떨어져 있다. 이 실험은 링잉 현상과 안테나의 주파수와의 관계를 검토하기 위한 실험으로, 고주파수인 250 MHz의 원시자료에서는 매우 심한 링잉 현상에 가려져 터널에 의한

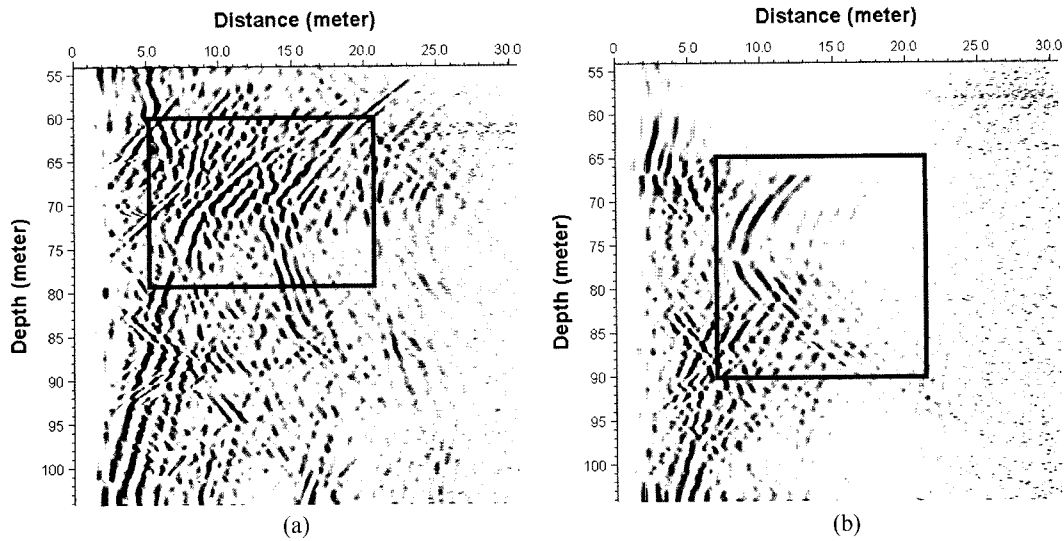


Fig. 7. Processed results of the borehole radar reflection surveys at the site A. (a) Borehole T-1. (b) Borehole T-8.

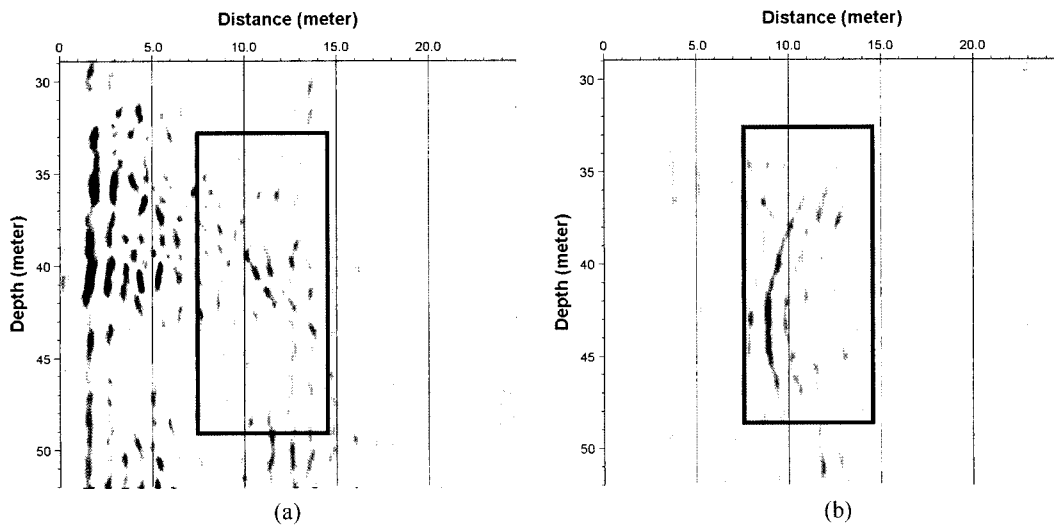


Fig. 8. Processed results of the borehole radar reflection surveys with different transmitter and receiver offsets at the borehole CB-5 of the site A; offset = 3 m (a), and offset = 10 m (b).

회절현상의 확인이 불가능하다. 상대적으로 낮은 주파수인 100 MHz의 자료에서도 상당한 링잉 잡음이 존재하긴 하지만, 터널에 의한 회절 현상은 뚜렷하게 관찰할 수 있다(Fig. 6(a)의 사각형). 이러한 링잉은 아래에서 논의할 탐사지역 B에서의 탐사 결과에서는 볼 수 없는 것으로, 그 원인을 시추공의 공경의 차이에서 찾아볼 수 있다. 즉 탐사지역 B의 시추공은 Nx 크기(75.4 mm)임에 반해, 탐사지역 A의 시추공은 6 인치(152.4 mm) 시추공으로 약 2배 가까이 공경이 크다. 시추공 내부의 물과 안테나 사이에 임피던스 부정합이 발생하며, 시추공의 공경이 증대되면 물의 영향이 증가하므로 임피던스 부정합의 정도가 증대함은 자명하다. 따라서 6 인치 시추공의 A 지역에서 3 인치 시추공의 B 지역 보다 훨씬 더 강한 링잉이 기록될 것이다. 또한 동일한 크기의 시추공일 경우에도 전자기

파의 파장이 짧을수록 물의 영향이 증대할 것이며, 파장이 길어지면 그 영향이 감소할 것은 쉽게 이해할 수 있다. 따라서 파장이 짧은 250 MHz 안테나를 사용한 자료에서는 링잉이 매우 심하게 나타나며, 상대적으로 파장이 긴 100 MHz 안테나 자료에서는 약하게 나타난다. 이 논문에서는 예시하지 않았으나 20 MHz 안테나를 이용한 탐사 결과에서는 링잉 잡음을 거의 무시할 수 있을 정도이었다는 점이 이와 같은 추론을 뒷받침한다. 따라서 큰 공경의 시추공에서 고분해능 영상을 획득하기 위해 고주파 안테나를 사용하여야만 하는 경우에는, 필수적으로 시추공 물의 영향을 제거하여야 한다. 이를 위한 현실적인 방안으로 시추공의 공경과 거의 비슷한 크기의 특수한 센트럴라이저를 제작하여 사용함으로써 시추공과 안테나 사이의 물의 양을 최대한 줄이는 방법이 추천된다.

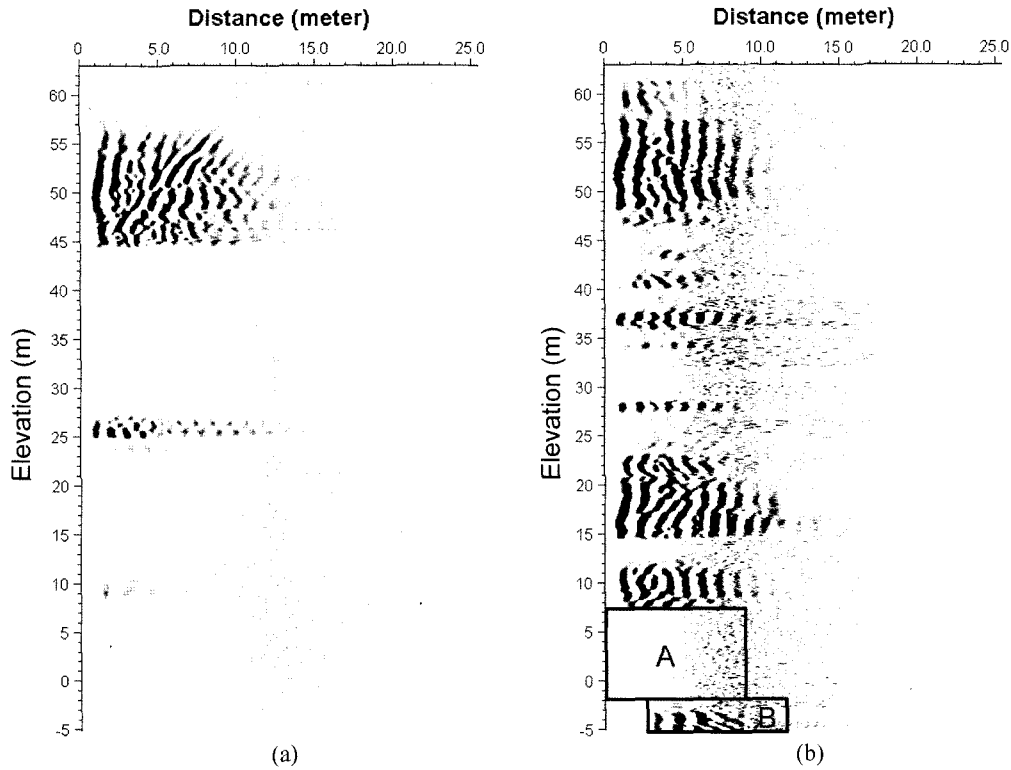


Fig. 9. Processed results of borehole radar reflection survey at BH-2 (a) and BH-3 (b) of the site C.

Fig. 7은 A 지역의 각기 다른 시추공으로부터 자료처리를 거친 100 MHz 안테나의 반사법 탐사 영상으로, (a)는 터널로부터 6.5 m 떨어진 곳에 위치하는 시추공 T-1, (b)는 8.5 m 떨어진 곳에 위치하는 시추공 T-8 으로부터의 결과이다. 터널로부터 거리가 가까운 (a)에서의 신호가 뚜렷하게 나오리라 기대했지만 결과는 정반대였다. 이는 시추공 T-1의 주변에 터널 이외의 다른 반사체가 T-8 주변에 비해 더 많으며, 3차원 상의 이러한 반사파와 2차원 영상 단면도에서 터널 회절파와 중첩되어 터널에 의한 신호를 왜곡한 때문이다. 이를 해결할 수 있는 방법은 수신 안테나를 방향성 안테나로 대체하는 것이다.

Fig. 8은 B 지역의 시추공 CB-5에서의 기본 자료처리 후의 시추공 반사법 탐사 영상이다. 이 시추공에서는 송·수신 안테나 간격을 측정 자료에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 안테나 간격을 3 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, 12 m 로 변화해가며 자료를 획득하였다. 이 중 Fig. 8(a)는 송·수신 안테나 간격이 3 m, (b)는 10 m 일 때의 결과를 예시한 것이다. 사각형으로 표시된 부분이 시추공으로부터 수평 거리 8 m 정도 떨어진 지하갱도로부터 반사된 회절파이다. 이 역시 위에서 논의한 바와 같이 회절 양상의 상부 포물선 회절파 에너지가 하부 포물선의 에너지보다 훨씬 강하게 나타난다.

Fig. 8(a)와 (b)를 비교하면 전체 에너지를 동일하게 유지하기 위한 이득 보정 등을 비롯한 동일한 자료처리 변수, 기법을 적용하였고, 또한 동일한 시추공 탐사자료임에도 불구하고 확연히 다른 양상을 보이고 있다. 송, 수신 안테나 간격이 좁은

Fig. 8(a)에서는 시추공에 가까이 발달하는 반사체에 의한 이벤트들이 잘 나타나 있는 반면에 지하 갱도에 의한 회절파는 상대적으로 뚜렷하지 않다. Fig. 8(a)에 비해 안테나 간격이 매우 넓은 (b)에서는 시추공에 가까이 발달하는 반사체의 이벤트들은 미약한 반면, 상대적으로 멀리 위치하는 갱도에 의한 회절파는 Fig. 8(a)에 비해 오히려 뚜렷하게 나타난다. 두 영상을 자세히 비교하여 보면, 시추공에 나란한, 즉 거의 수직으로 발달하는 이상대에 의한 반사파는 송, 수신 안테나가 좁은 경우의 반사영상에서 더욱 뚜렷함을 알 수 있다. 이에 반해 이상대가 경사진 경우, 시추공에서 가까운 부분은 안테나 간격을 좁게 설정한 영상에서, 멀리 떨어진 부분은 간격을 넓게 설정한 영상에서 상대적으로 더욱 뚜렷하게 나타난다. 갱도는 0°에서 90°까지 모든 경사를 갖고 있는 반사체로 근사할 수 있으므로 안테나 간격을 넓게 설정한 영상에서 더욱 뚜렷하게 영상화될 것이다. 물론 이는 터널과 시추공 사이의 거리와 안테나 간격의 상대적인 비율의 변화에 따라 달라질 수 있으며 터널이 시추공에 가까이 위치하는 경우에는 물론 안테나 간격이 좁은 영상에서 뚜렷하게 나타날 것이다. 이와 같은 실험을 통하여 터널을 탐지하기 위해 시추공 레이더 반사법 탐사를 적용하는 경우에는 안테나 간격에 대한 주의 깊은 고려가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 9는 C 지역의 BH-2와 BH-3에서 획득한 결과로써 기본 자료처리 후의 영상이다. 전술한 바와 같이 이 지역은 폐연·아연 광산이 있었던 곳으로 매질의 전기 비저항이 매우 낮을



Fig. 10. Photographic views of the directional antenna equipped with the centralizer (white part) specially designed.

것으로 예상되었던 곳이다. 실제 탐사에서 전기비저항이 10 ohm-m가 이하 인 경우가 대부분이었다(Kim *et al.*, 2004b). Fig. 9(a)에서는 일부 반사 이벤트가 수신되는 표고 55 m~45 m 구간 이외의 대부분의 구간에서 직접파마저도 심한 감쇄에 의해 수신 안테나에 감지되지 않음을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 (a)에 비해서는 좀 더 많은 구간에서 반사 이벤트가 나타나지만, 그림에 표시한 A구간과 같이 전혀 신호가 수신되지 않은 구간도 많이 나타난다. B로 표시된 구간은 시추공이 물로 찬 지하 갱도를 관통한 곳이며, 직접파가 물의 낮은 레이다파 속도에 의해 상당히 지연되어 도착한 것을 확인할 수 있다. 이 지역의 지하갱도는 광맥을 따라 형성이 되어 갱도 주변은 전기 비저항이 매우 낮다. 따라서 직접파 조차 측정되지 않는 부분에 갱도가 존재할 가능성이 높으며 시추공 레이다 반사법 탐사의 효용성이 매우 적음을 알 수 있다. 이 지역의 전기비저항 토모그래피 결과와 비교해 보면 매질이 전기 비저항이 50 ohm-m 이하가 되면 가탐심도가 많이 제한되고 10 ohm-m 이하에서는 직접파조차도 측정되지 않음을 알 수 있었다.

방향탐지 안테나 시추공 반사법 탐사

전 절에서 논의한 바와 같이 반사체의 방위각에 대한 정보의 획득뿐만 아니라 서로 다른 방향에서 동시에 안테나에 입사된 신호를 입사각에 따라 분리하기 위해서도 방향성 안테나의 이용이 필요하다. A 지역의 시추공 T-8에서 방향성 안테나 시스템의 터널 탐지 적용성을 평가하기 위해 시추공 반사법 탐사를 수행하였다. Fig. 10에 방향성 안테나 시스템의 사진이 수록되어 있다. 왼쪽 사진에서 중앙의 하얀색 원통이 장착되어 있는 것이 방향성 수신 안테나이며, 좌측이 송신 쌍극자 안테나와 외장 배터리 팩이다. 수신 안테나에 장착된 하얀 원통은 특수하게 제작된 센트럴라이저로 수신안테나 상부의 프레임 안테나 요소가 있는 부분을 감싸 시추공과 안테나 사이에 물이 채워지는 것을 최소화하고 시추공 내에서 정확한 중심을 잡아주는 역할을 하게 된다. 오른쪽 사진은 시추공에 삽입하기

직전에 촬영한 사진이며, 전체 시스템이 완전히 결합된 상태이다.

방향성 안테나의 4 성분 자료를 이용하여 임의의 방향을 향하는 루프 안테나 신호를 인공적으로 합성할 수 있다. 쌍극자 안테나는 무지향성임에 반해 루프 안테나는 뚜렷한 지향성을 가지며 이를 이용하여 반사파의 입사각을 계산할 수 있다. Fig. 11의 두 영상은 방향성 안테나 자료로부터 인공적으로 합성한 루프 안테나 영상으로써, (a)는 동쪽 방향, (b)는 남쪽 방향의 영상을 보여준다. Fig. 11(a)에서는 터널에 의한 회절과는 보이지 않으며 주변의 파쇄대에 의한 반사 이벤트가 강하게 영상화되어 있다. 반면에 Fig. 11(b)에서는 터널에 의한 회절과가 강하게 나타나며, 이로써 터널이 시추공의 남쪽에 위치함을 알 수 있다.

그러나 방향이 180° 다른 두 루프 안테나 신호는 거의 동일할 정도로 유사하다. 이는 루프 안테나의 특성을 상정하면 매우 쉽게 이해할 수 있다. Fig. 11에는 남쪽 방향의 합성 신호만을 수록하였으나, 북쪽 방향 합성 루프 안테나 신호에서도 동일하게 회절과가 매우 강하게 영상화 된다. 따라서 남, 북 두 방향 중에서 한 방향을 결정하여야 하나, 이는 합성 루프 안테나 신호만으로는 불가능하므로 다음과 같은 방법을 도입하여 결정하게 된다. 180° 서로 다른 두 방향으로 루프 안테나에 동일한 신호가 입사되는 경우, 두 신호의 진폭은 동일하나 위상은 180° 반전된다. 이에 반해 쌍극자 안테나는 무지향성이므로 입사각에 무관하게 위상이 동일하다. 방향성 안테나 신호로부터 루프 안테나 이외에 쌍극자 안테나 신호 또한 인공적으로 합성할 수 있으며, 합성된 루프 안테나, 쌍극자 안테나 두 신호의 위상을 비교함으로써 루프 안테나에서 결정된 두 방향 중 한 방향을 결정할 수 있다. 남쪽 방향과 북쪽 방향의 두 방향 루프 안테나 신호와 쌍극자 안테나 신호를 비교한 결과, 회절 현상을 발생시키는 이상체, 즉 터널이 남쪽에 위치함을 확인할 수 있었다.

합성 루프 안테나 영상인 Fig. 11과 쌍극자 안테나 영상인 Fig. 7(b)를 비교해 보면 저주파수를 사용하는 방향탐지 안테

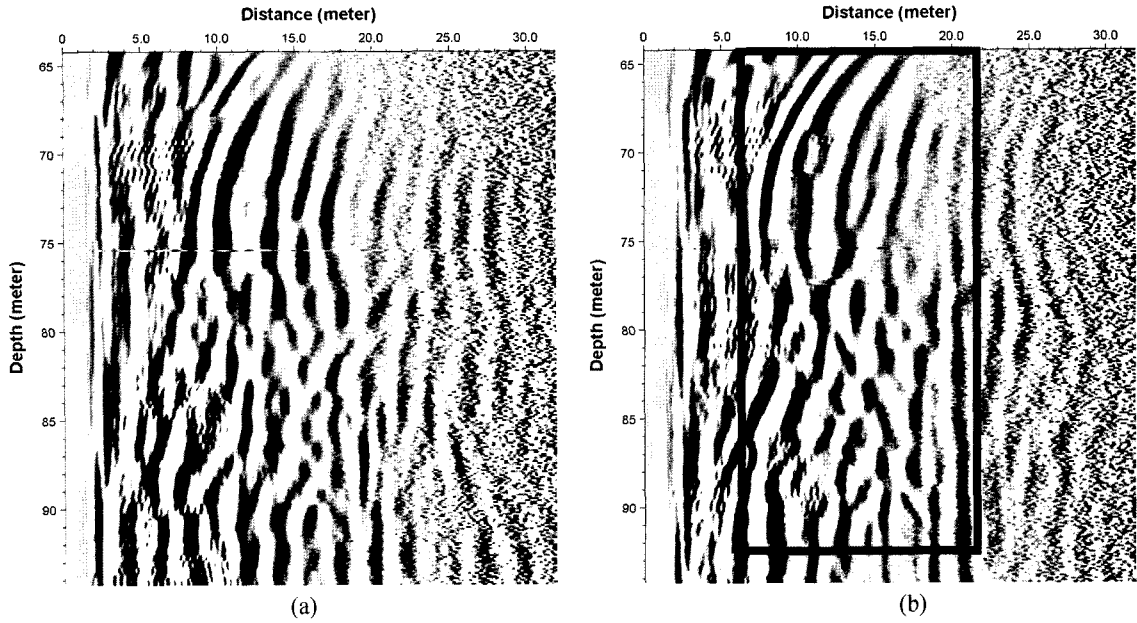


Fig. 11. Azimuthal component images having specific directions. These images are synthesized using the four component data recorded by directional antenna at T-8 of the site A. (a) Image of east azimuthal direction. (b) Image of south azimuthal direction.

나의 분해능이 떨어지는 것은 당연하나, 가탐심도 역시 거의 비슷한 수준이거나 떨어지는 수준임을 알 수 있다. 이는 합성 루프 안테나 신호의 S/N 비가 쌍극자 안테나에 비해 낮다는 것을 의미하며, 방향성 안테나를 이용한 탐사의 한계성 중의 하나라고 할 수 있다. 방향성 안테나 반사법 탐사는 쌍극자 안테나를 채용한 경우보다 현장탐사와 자료해석 모두 상당한 기술을 요한다. 따라서 방향성 안테나를 적용하여야만 하는 경우라도 그 이전에 쌍극자 안테나 탐사를 수행하여 지하 반사체의 특성에 대해 파악한 이후에 적용하여야 할 것이다.

크로스홀 스캐닝 탐사

A 지역의 DT-25와 T-3 시추공을 이용하여 크로스홀 스캐닝을 실시하였다. 시추공간의 거리는 14.5 m였으며, 송신 시추공은 DT-25, 수신 시추공은 T-3 이었다. 동일한 송수신 심도로 65 m에서 85 m 까지 매 10 cm 간격으로 자료를 획득하였다. Fig. 12에 측정 결과가 도시되어 있다. 그림에서 보면 심도 75 m를 전후로 해서 사각형으로 표시한 블록 튀어나온 곳이 있는데 이는 레이더 파가 지하 갱도 내의 공기로 충전된 곳을 통과하여 레이더 파가 빨리 도달하여 발생한 것이다. 이로써 빈 갱도가 두 시추공 사이 75 m 심도에 부존하고 있음을 매우 쉽게 확인할 수 있다.

이 방법은 측정시간이 반사법 탐사에 비해서는 많이 걸리나 토모그래피에 비해서는 훨씬 덜 소요되므로, 두 시추공 사이에 지하갱도가 존재하는가를 비교적 쉽게 알아낼 수 있다는 장점이 있다. 그러나 시추공 사이의 터널의 수평위치를 정확히 판별하기는 거의 불가능하며, 지하갱도가 물이나 다른 물질로 충

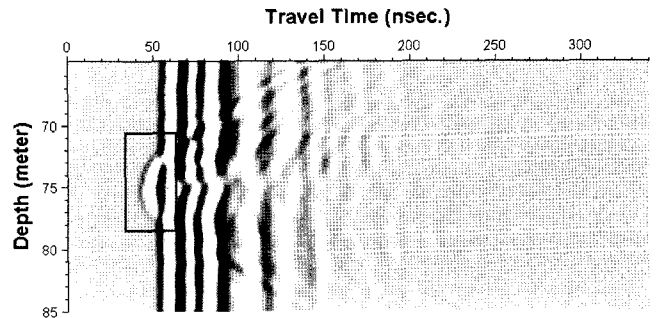


Fig. 12. Result of crosshole scanning between DT-25 and T-3 boreholes at the site A.

진되어 있을 때는 확연한 차이를 보기가 힘들다. 따라서 이 방법은 시추공 레이더 반사법 탐사와 같이 사용하여 탐사의 신뢰도를 높이는 방법으로 이용됨이 타당하다 하겠다. 뿐만 아니라 시간이 매우 많이 소요되는 토모그래피 탐사에 선행하여 적용하여 두 시추공 사이의 레이더 파 전파 특성에 대한 정보를 사전에 획득함으로써 토모그래피 탐사의 설계 및 해석에 필요한 자료를 제공함에 또 다른 탐사 의미가 있다.

시추공 레이더 토모그래피

지하의 유전을 분포는 레이더 파의 전파 속도에 가장 큰 영향을 미친다. 유전율이 낮을수록 레이더 파의 전파속도는 높아지며, 높을수록 전파속도는 낮아진다. 자연계에서 유전율이 가장 높은 물질이 물이며 땅에서의 레이더 파의 속도는 물의 함량에 크게 좌우된다. 이 연구의 주목적인 폐갱도 또는 터널의 경우에는 이를 충전하고 있는 물질에 따라서 반응이 달라진다.

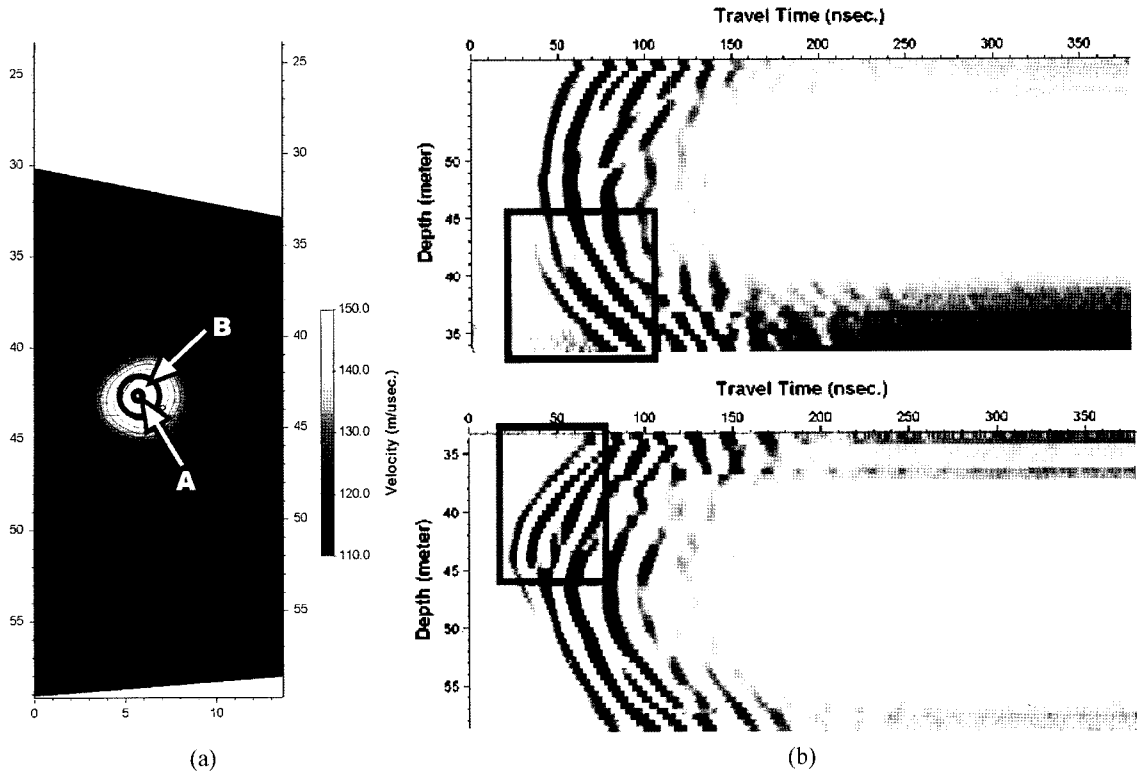


Fig. 13. Velocity tomogram between CB-5 and CB-6 boreholes (a) and two examples of common shot gathers (b) at the site B. Early arrived electromagnetic head waves (rectangle) passing by the empty tunnel are clearly identified on the common shot gathers.

즉 터널이 비어있는 경우, 다시 말해 공기로 충전되어 있는 경우에는 충전물질의 속도가 대단히 높으므로 주변 암석보다 현저히 높은 속도로 영상화된다. 이에 반해 물이나 점토로 충전되어 있는 경우에는 충전물질의 속도가 대단히 낮으므로 주변 암석보다 낮은 속도로 영상화된다.

Fig. 13은 B 지역에서의 레이더 토모그래피 탐사 결과로 송신 안테나가 위치한 시추공은 CB-6이며 심도 30.2 m에서 59.2 m까지 측정 간격 1 m로 탐사를 수행하였다. 한편, 수신 안테나가 위치한 시추공 CB-5에서는 심도 33.5 m에서 58.5 m까지 0.5 m 측정간격으로 안테나를 이동시키면서 자료를 획득하였다.

Fig. 13(a)는 발췌한 초동 자료를 역산하여 두 시추공 사이의 물질 분포 상태를 레이더 파의 속도로 구현한 토모그래피 영상이다. 영상의 중앙 부근에 거의 원형인 형태로 고속도 이상이 뚜렷하게 나타나 있으며, 시추공 레이더 반사법 탐사에 의한 터널의 중심점(A)과 토모그래피 영상에서 해석한 터널의 위치(B)를 함께 도시하였다. Fig. 13(a)에서 보듯이 토모그래피 탐사는 지하공동의 위치 뿐만 아니라 지하 물성 정보를 동시에 주는 장점이 있으나, 탐사 자료양이 매우 많기 때문에 현장 자료 획득 및 자료 처리에 매우 많은 시간이 요구된다. Fig. 13(b)는 공통 송신점 취합 자료로 위의 자료는 송신원이 47.2 m에 있을 때 밑의 자료는 송신원이 44.2 m에 있을 때의 자료이다. 그림에서 네모 상자안은 송신기로부터 복사된 레이더 파

가 공기로 충전된 터널을 지나면서 속도가 빨라져 선두파로 나온 것을 보여주는 것이다. 이러한 원시자료는 현장 측정 단계에서 비어 있는 터널을 확인 할 수 있는 좋은 지시자료도 사용될 수 있다.

Fig. 14는 A 지역에서의 레이더 토모그래피 탐사 결과로 송신 안테나가 위치한 시추공은 DT-25이며 심도 65 m에서 85 m까지 측정 간격 1 m로 탐사를 수행하였다. 수신 안테나가 위치한 시추공 T-3에서는 심도 65 m에서 85 m까지 0.2 m 측정 간격으로 안테나를 이동시키면서 자료를 획득하였다. Fig. 14(a)는 현장자료를 전산처리하여 영상화한 결과로서, 두 시추공 사이의 지하 물질의 분포 상태를 레이더 파의 속도로 표현한 레이더 속도 토모그래피 영상이다. 영상의 중앙 부근에 거의 원형으로 고속도 이상이 뚜렷하게 나타나 있다. 그러나 Fig. 13(a)와 비교하면 덜 뚜렷한 모양을 보여주는데, 이는 Fig. 13(a)는 시추공의 공폭도까지 고려하여 역산을 수행한 결과임에 반해, Fig. 14(a)의 영상은 이를 고려하지 않았기 때문이다. 토모그래피는 미세한 초기도달파의 차이에 의해 지하를 영상화하는 방법이기 때문에 정확한 거리 정보가 매우 중요하며 따라서 비록 적은 양의 편차라도 공폭도를 정확히 측정하여 이를 영상작성에 반영하여야 한다.

Fig. 14(b)는 Fig. 13(b)와 마찬가지로 공통 송신점 취합 자료로 위의 자료는 송신원이 81 m에 있을 때 밑의 자료는 송신원이 72 m에 있을 때의 자료이다. 그림에서 네모 상자 안은

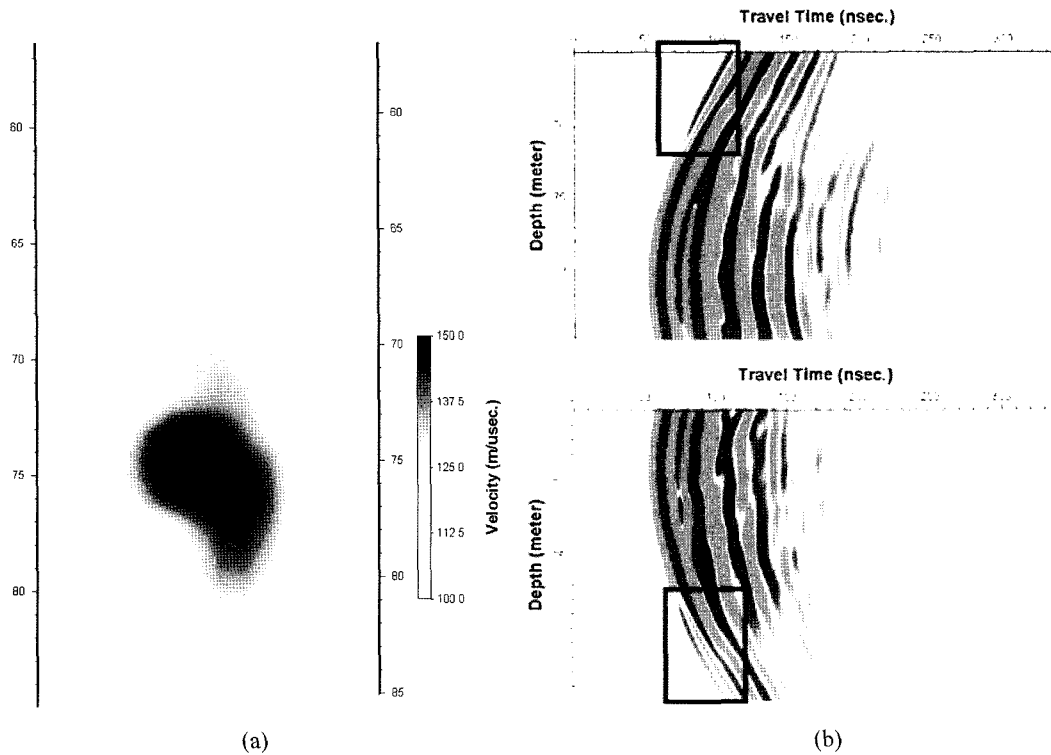


Fig. 14. Velocity tomogram between DT-25 and T-3 boreholes (a) and two examples of common shot gathers (b) at the site A. Early arrived electromagnetic head waves (rectangle) passing by the empty tunnel are clearly identified on the common shot gathers.

송신기로부터 복사된 레이더 파가 공기로 충전 된 터널을 지나면서 속도가 빨라져 선두파로 나온 것을 잘 보여준다.

결 론

이 연구에서는 ① 시추공 레이더 반사법 탐사, ② 방향성 안테나를 이용한 반사법 탐사, ③ 크로스홀 스캐닝(crosshole scanning), ④ 레이더 토모그래피의 4 종류 시추공 레이더 탐사법을 3 개소의 시험 탐사지역에 적용한 사례를 통해 시추공 레이더 탐사법의 터널 탐지에 대한 적용성과 한계를 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시추공 레이더 반사법 탐사에서 나타나는 터널로부터의 회절 양상은, 이상적인 점 반사원에서 나타나는 완벽한 쌍곡선 형태보다는, 쌍곡선의 상부 곡선을 따라 회절파의 에너지가 강하며 하부곡선을 따라서는 매우 미약함을 보임이 특징적이다. 이는 터널이 원형이 아닌 반원형에 가까운 형태임에 주 원인이 있다.

2. 시추공 레이더 반사법 탐사에서 시추공의 공경이 클수록, 안테나 중심주파수가 높을수록 링잉 잡음이 강하게 나타난다.

3. 송·수신 안테나 사이의 간격에 따라 신호의 양상이 많이 달라지므로 터널 부존 현황 등을 고려하여 안테나 간격을 선택하여야 하며, 가능하면 안테나 간격을 달리하며 탐사자료

를 취득한 후, 이들을 비교, 해석함이 추천된다.

4. 모든 시추공 레이더 탐사는 전기전도도가 높은 환경에 대한 적용이 어려우며, 전기비저항이 50 ohm-m 이하인 조건하에서는 토모그래피 뿐만 아니라 반사법 탐사 또한 사실상 불가능하다.

5. 방향성 안테나를 이용한 반사법 탐사는 한 시추공만을 이용하여 터널의 3차원적인 위치를 판별할 수 있는 대단히 큰 장점이 있으나, 현장 작업 및 해석의 난이도가 매우 높고, 시간이 많이 걸리는 단점이 있으며, 분해능이 낮고 저주파수를 쓰는데 비해 가탐심도가 낮아 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.

6. 레이더 토모그래피는 이상대를 영상화할 뿐만 아니라 레이더 파의 속도로 조명한 지반 물성 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

7. 크로스홀 스캐닝은 터널의 유무에 대한 좋은 지표를 제공할 있으며, 시추공 레이더 반사법 탐사와 같이 사용한다면 신뢰도가 높은 결과를 기대할 수 있을 것이다.

8. 위의 결론을 종합하여 체계적이고 효과적인 터널 탐지 방법을 제안하면, 먼저 시추공 레이더 반사법 탐사를 통해 이상 징후를 탐지 한 후, 주변의 여건을 고려하여 방향성 안테나 탐사를 수행하여 터널 반사 신호를 분리하여 3차원적인 위치를 확인하는 것이다. 두 공 이상의 시추공이 존재할 경우, 크로스홀 스캐닝을 수행함이 추천되며, 토모그래피는 부차적인 탐사

목적과 경제적인 여건을 고려하여 적용함이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 전문연구사업인 ‘지하정밀 영상화 융합기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이 논문의 오류와 미비한 점을 지적하여 주신 익명의 심사자에게 감사드립니다.

참고문헌

- 권광수, 조원재, 최용석 등, 2000, 문경지역 지반안정성 정밀조사, 석탄합리화사업단 기술총서 2000-03(한국자원연구소 보고서), 326p.
- 설순지, 김정호, 조성준, 이명중, 정승환, 2001, 화강암 석산 지역에서의 레이더 탐사의 적용, 물리탐사, **4**, 8-18.
- Choi, H., and Ra, J., 1999, Detection and identification of a tunnel by iterative inversion from cross-borehole CW measurements, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **21**, 458-465.
- Ebihara, S., 2004, Directional borehole radar with dipole antenna array using optical modulators, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **44**, 45-58.
- Ellefsen, K. J., and Wright, D. L., 2005, Radiation pattern of a borehole radar antenna, *Geophysics*, **70**, K1-K11.
- Kim, J.-H., Cho, S.-J., and Chung, S.-H., 1998, Three-dimensional imaging of fractures with direction finding antenna in borehole radar survey, *Proceedings of the 4th SEGJ international symposium*, 291-296.
- Kim, J.-H., Cho, S.-J., and Yi, M.-J., 2004a, Borehole radar survey to explore limestone cavities for the construction of a highway bridge, *Exploration Geophysics*, **35**, 80-87.
- Kim, J.-H., Yi, M.-J., and Cho, S.-J., 2004b, Application of crosshole resistivity anisotropy tomography to the safety analysis of a high storied building over an abandoned old mine, in *Proc. 66th EAGE Conference and Exhibition*, in CD.
- Kim, J.-H., Yi, M.-J., and Cho, S.-J., 2005, Application of high-resolution geoelectric imaging techniques to geotechnical engineering in Korea, *Geosystem Engineering*, **8**, 23-34.
- Takayama, T., and Sato, M., 2006, A new DoA estimation algorithm for directional borehole radar, *Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 19-22, Columbus Ohio, USA, in CD.
- Zhou, H., and Sato, M., 2000, Application of vertical radar profiling technique to Sendai Castle, *Geophysics*, **65**, 533-539.
- Zhou, H., and Sato, M., 2004, Subsurface cavity imaging by crosshole borehole radar measurements, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **37**, 828-837.