

방향탐지 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사에 있어서 반사층 방위각의 자동 결정

김정호 · 조성준 · 이명종 · 정승환¹⁾

Automatic Determination of the Azimuth Angle of Reflectors in Borehole Radar Reflection Data Using Direction-finding Antenna

Jung-Ho Kim, Seong-Jun Cho, Myeong-Jong Yi and Seung-Hwan Chung

요 약 : 시추공 레이더 반사법 탐사는 기반암 하부에 대한 고해상도 영상을 얻을 수 있으나, 그 원리상 반사층의 방위각 정보의 획득이 불가능하기 때문에 감지된 지하 불균질대가 시추공을 중심으로 어느 방향에 위치하는가를 알 수가 없다는 문제가 있다. 반사층의 방위각 정보의 획득을 위하여, 방향탐지 안테나를 이용한 탐사가 이용된다. 그러나 지금까지 사용되고 있는 방향탐지 안테나 탐사자료의 해석 방법은 시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라, 때로는 해석에 있어서 오류를 유발할 가능성까지 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 반사층의 방위각을 자동 결정할 수 있는 방법을 개발하였다. 알고리즘은 최소자승 오차의 개념 하에서 최대 또는 최소 진폭을 나타낼 수 있는 전자파의 입사각을 결정함에 그 원리를 두고 있다. 새로이 개발된 알고리즘을 이용하여 석산자원탐사 목적으로 수행된 탐사자료의 방위각 영상을 작성하였으며, 이를 통하여 거의 대부분의 반사층의 방위각에 대한 정보를 획득할 수 있었다. 지질조사 결과 확인된 단층 및 암맥, 그리고 지표에 인위적으로 존재하는 채석단면의 위치 등의 알려진 구조의 위치와, 방향탐지 안테나 영상에서 확인된 방위각과 매우 잘 일치하고 있음이 확인되었으며, 이러한 사실은 본 연구에서 개발된 방위각 자동 결정 알고리즘의 정확성을 대변하여 주고 있다.

Abstract : The borehole radar reflection survey can image the underground structure with high resolution, however, we cannot get any information on the orientation of the reflectors with dipole antenna alone. The direction-finding antenna system is commonly used to give the solution to the problem. However, the interpretation of the data from direction-finding antenna may be time-consuming, and sometimes have ambiguities in the sense of precise determination of the azimuth. To solve the problem, we developed the automatic azimuth finding scheme of reflectors in borehole radar reflection data using direction-finding antenna. The algorithm is based on finding the azimuthal angle possibly showing the maximum reflection amplitude in the least-squared error sense. The developed algorithm was applied to the field data acquired in quarry mine. It was possible to locate nearly all of the reflectors in three dimensional fashion, which coincide with the known geological structures and man-made discontinuities.

Keywords : direction-finding antenna, borehole radar, azimuth angle, GPR, fracture

서 론

시추공 내에 레이더 안테나를 위치시키고 지하의 불균질대에서 반사된 레이더파를 이용하여 지하구조를 영상화하는 시추공 레이더 반사법 탐사는, 전기전도도가 토양층보다 낮은 기반암에 레이더 안테나가 위치하기 때문에 기반암 내에 발달되어 있는 열극대, 암맥, 파쇄대 등, 불균질대의 고분해능 영상화를 가능하게 한다. 시추공 레이더 탐사는 60, 70년대에는 주로 암염, 칼리 광산, 또는 고비저항 환경 하에 배태되어 있는 금속 광상의 탐지에 주로 이용되었다(Nickle and Cerny, 1989; Mundry *et al.*, 1983). 1980 년대에 들어 지하 핵폐기물 처분장을 위한 부지 특성조사의 일환으로 미세 균열대 및 파

쇄대를 탐지하기 위하여 현대적인 개념의 레이더 탐사기 하드웨어가 개발 및 적용되었으며, 매우 효과적인 방법으로 판명되었다(Olsson *et al.*, 1990). 최근에는 지하 핵폐기물 처분장 부지조사 뿐만 아니라, 안정성이 요구되는 토목 부지 조사 등에 광범위하게 활용되고 있다.

쌍극자 안테나를 사용하는 통상적인 시추공 레이더 탐사는 지하의 불균질대에 대하여 매우 높은 분해능의 영상화가 가능하다는 장점이 있으나, 불균질대의 방위각 정보의 획득이 불가능하다는 데에 문제점이 있다. 이는 레이더 안테나가 시추공 속에 위치하므로, 시추공을 중심으로 하여 360도 전방위에서 레이더 반사파가 입사되기 때문이다. 즉 Fig. 1에서 도식적으로 묘사한 것처럼, 영상에서 확인된 불균질대는 시

*1998년 11월 5일 접수

1) 한국자원연구소(Korea institute of Geology, Mining & Materials) 자원연구부

방향탐지 안테나의 원리

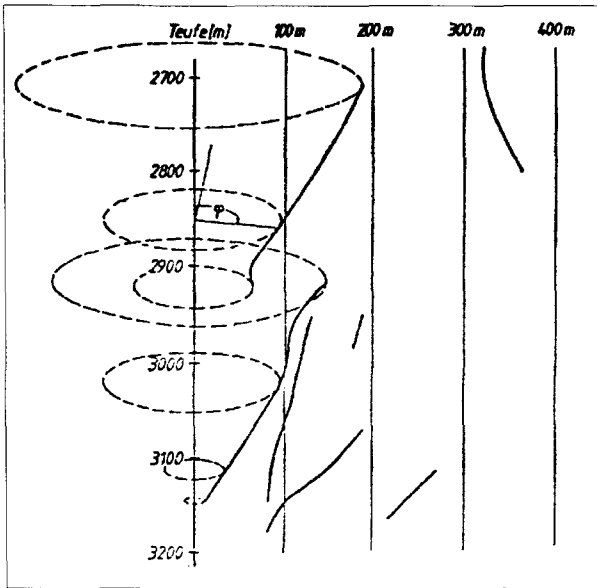


Fig. 1. Depth, distance from the borehole, and dip angle of underground inhomogeneities can be extracted from the borehole radar reflection image using dipole antenna, but azimuth angle, cannot be determined (after Sender and Thierbach, 1987).

추공을 중심축으로 하고 시추공으로부터의 거리를 반지름으로 한 원호상 임의의 한 점에 존재한다. 그러므로 시추공 레이더 반사법 탐사 영상에서 확인된 불균질대의 3차원적인 부존 정보를 얻기 위해서는, 불균질대가 Fig. 1의 원호상에서 어느 지점에 존재하는가, 즉 시추공을 중심으로 한 방위각에 대한 정보의 획득이 필요하다. 이에 대한 해답이 방향탐지 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사이다.

방향탐지 안테나는 국내에서는 1993년도에 한국자원연구소에 의해 최초로 국내에 도입된 이후, 지반조사, 석산탐사, 터널의 탐지 등에 적용되어 온 바가 있다. 방향 탐지 안테나 탐사자료의 해석은 임의의 각도에 대하여 합성 레이더 반사 영상(synthetic radar reflection image)을 계산하고, 화면상에서 영상을 구성해 본 후, 각 영상에서 반사파의 진폭을 비교하여 최대 혹은 최소 진폭을 나타내는 방위각을 획득한 후, 다시 합성 쌍극자 안테나 레이더 반사파와 위상을 비교함으로써 그 방위를 결정하는 방법을 따른다. 이와 같은 접근 방향은 최대 혹은 최소 진폭을 나타내는 방위의 정확한 결정이 어려울 뿐만 아니라, 합성 쌍극자 반사 영상과 위상의 비교가 대단히 어려우며, 이러한 모든 것의 판단을 해석자의 시각에 의존한다는 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 방향탐지 안테나 탐사자료로부터 자동적으로 반사 이벤트의 방위각을 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하여, 상기한 바와 같은 방향탐지 안테나 탐사자료의 해석에 수반되는 제반 문제점을 해결하고자 한다. 나아가서 본 연구에서 개발된 알고리즘을 이용하여 국내 석산 지역에서 획득된 탐사자료를 처리하고, 지표 지질조사 결과와 대비함으로써 그 효용성을 입증하고자 한다.

레이더 탐사에서 사용되는 안테나는 거의 대부분 쌍극자 안테나를 사용한다. 각종 안테나 중 송, 수신 신호의 주파수 대역이 가장 넓어, 펄스형의 신호의 발생 또는 재현에 매우 적합할 뿐만 아니라, S/N 비가 가장 높기 때문이다. 그러나 쌍극자 안테나는 그 중심축을 기준으로 할 때에는 무지향성이며, 입력 신호의 방향에 대한 정보를 획득할 수 없다. 입력 신호의 방향에 대한 정보를 획득하기 위해서는 안테나가 지향성을 갖고 있어야 한다. 지향성을 갖는 안테나는 매우 많은 종류가 있으며, 일반 공중전파 수신에서 사용되고 있는 안테나 또한 대부분 강한 지향성 안테나이다. 그러나 시추공 레이더 탐사에서는, 시추공이라는 기하학적인 특수성 때문에 복잡한 형태의 안테나는 사용 불가능하며, 거의 대부분 간단한 루프 안테나(loop antenna)를 사용한다. 한국자원연구소에서 보유하고 있는 방향탐지 안테나 또한 일종의 루프 안테나의 원리를 이용한 것이다.

Fig. 2는 쌍극자 안테나와 루프 안테나의 방사 패턴 모식도이다. 그림에서 좌표의 원점이 안테나 중심축이 된다. 그림에서 점선으로 표시한 원이 쌍극자 안테나 방사 패턴이며, 따라서 안테나 중심축에 수직인 단면상에서는 완전한 무지향성을 갖는다. 그림에서 실선으로 표시한 두 원이 루프 안테나의 방사 패턴이며, 안테나의 루프 면은 그 중심이 좌표원점이며 y 축을 포함하는 $x=0$ 평면이다. 그림에서 알 수 있듯이, 루프 안테나의 최대 진폭 방향은 루프 면에 직교하는 방향이며, 최소 방향은 루프 면을 따른다. 따라서 만약 루프 안테나 신호를 이용하여 최대, 혹은 최소 입사 방향을 결정할 수 있다면 입사 전자기파의 방향을 알 수 있다.

Fig. 3은 방향탐지 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사 실험 결과를 나타낸 것으로, 루프 안테나를 시추공 내에서 일정 각도로 회전시키면서 획득한 레이더 탐사 트레이스를 그 각도에 따라 그려 본 것이다. 그림에서 나타나는 것처럼 일정한 방향에서 신호의 최대 또는 최소 진폭을 갖는 것을

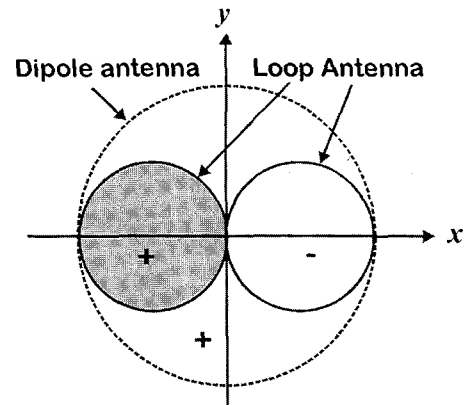


Fig. 2. Schematic presentation of radiation patterns of dipole and loop antenna.

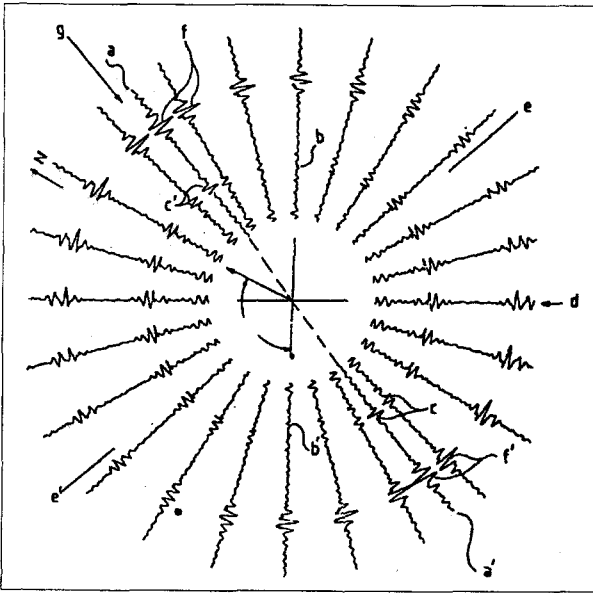


Fig. 3. An example of radar reflection signals detected by loop antenna at fixed depth in a borehole, when rotating it (after Mundry et al., 1983).

알 수 있으며, 이로부터 반사층의 방위각을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3에 나타나 있는 것처럼, 최대 또는 최소 진폭을 보여주는 방향은 180도 서로 다른 두 방향이다. 이는 Fig. 2의 루프 안테나의 방사 패턴이 루프 면을 중심으로 하여 두 원으로 구성되는 것으로 잘 알 수 있다. 이와 같은 두 방향에서 한 방향으로의 결정은 Fig. 2가 암시하는 바, 루프 면을 기준면으로 하여 형성되는 두 쌍의 원에서 위상이 서로 반대라는 점을 이용하여 방향을 결정한다. 위상의 기준은 쌍극자 안테나의 경우에는 방향에 관계없이 그 부호가 같으므로, 쌍극자 안테나의 위상을 기준으로 하여 180도 서로 다른 방향에서 한 방향을 결정할 수 있다.

이와 같은 원리 하에서 방향탐지 안테나에서 수신된 신호로부터 반사파의 방향을 결정할 수 있으나 실제적으로는 그렇게 간단하지 않다. 입사 방향에 따른 반사파의 진폭 변화가 Fig. 2에 표시된 바와 같이 이상적인 최소 또는 최대치를 갖는다면, 루프 면에 나란한 방향으로 입사된 반사파는 제로의 진폭을 나타낼 것이므로 정확하게 그 방향을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3에 예시된 바와 같이 방향이 달라짐에 따라, 어느 정도 반사파 진폭의 변화는 보이기 는 하나, 최소 혹은 최대 진폭을 보여주는 방향이 그다지 뚜렷하지 못하다. 그 이유는 실제적으로 루프 안테나가 Fig. 2와 같은 이상적인 방사 패턴을 가질 수 없을 뿐만 아니라, 시추공이라는 특수성 때문에 시추공 방향으로 매우 긴 형태를 취하기 때문이다.

방위각 결정 알고리즘

본 연구에서 개발한 알고리즘은 Dürbaum 등(1986)이 제안

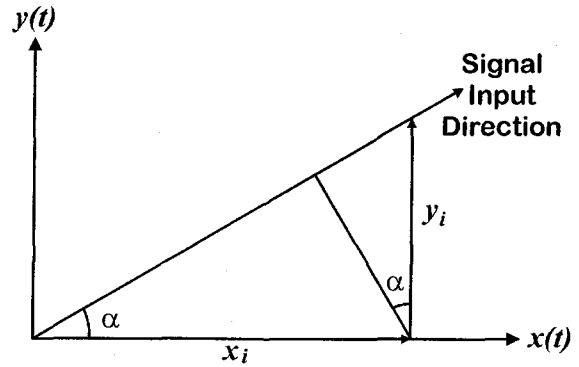


Fig. 4. The amplitude of input radar wave with incident angle α can be calculated from those of two orthogonal loop antennas.

한 방법에 기초하고 있다. Dürbaum 등(1986)이 제안한 방법은 한 개의 반사 이벤트에 대하여 방위각을 결정하는 데에 반해, 본 연구의 알고리즘은 임의의 반사파에 대하여 방위각 결정이 가능하도록 자동화할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 4와 같이 x축에 대하여 각도 α 를 갖고 입사하는 신호 $s(t)$ 는 x축 성분과 y축 성분으로 분리될 수 있다. 또한 반대로 x축 및 y축에 나란한 두 개의 이상적인 루프 안테나가 존재하고, 이에 감지된 신호를 각각 $x(t)$, $y(t)$ 라고 한다면, 각도 α 를 갖는 루프 안테나 입사신호 $s(t)$ 는 두 직교하는 루프 안테나에 감지된 신호의 벡터적인 합으로 표시될 수 있을 것이다. 즉, i 번째 시간 샘플을 첨자 i 로 나타내면

$$s_i = x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{1}$$

반사파의 입사각 α 는 상기 식으로 계산될 수 있는 s_i 가 최대 에너지를 나타낼 때의 α 로 결정될 수 있다. 즉 시간 샘플 간격 i_1, i_2 사이에 반사파가 수신되었다면 반사파의 에너지 $Q(\alpha)$ 가 다음 식과 같이 최대 값을 나타내도록 하는 α 가 바로 입사각 α 가 될 것이다.

$$Q(\alpha) = \sum_{i=1}^{i_1} s_i^2 = \sum_{i=1}^{i_1} (x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha)^2 \cong \text{MAX} \tag{2}$$

상기 함수가 최대 또는 최소값을 갖는 α 는 다음 방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = 2 \sum (x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha)(-x_i \sin \alpha + y_i \cos \alpha) = 0 \tag{3}$$

(3)식을 구하고자 하는 방위각 α 에 대하여 정리하면

$$(\sum x_i y_i) \tan^2 \alpha + (\sum x_i^2 - \sum y_i^2) \tan \alpha - \sum x_i y_i = 0 \tag{4}$$

(4)식으로부터

$$\tan \alpha = \frac{1}{2 \sum x_i y_i} [(\sum x_i^2 - \sum y_i^2) \pm \sqrt{(\sum x_i^2 - \sum y_i^2)^2 + 4(\sum x_i y_i)^2}] \tag{5}$$

(5)식으로 계산되는 값은 최대 및 최소의 에너지를 나타내는 입사각이므로 두 α 를 다시 (2)식에 대입하여 큰 값을 나타내

는 각을 선택한다.

이와 같이 계산된 입사각 α 는 360도 전 방위를 생각할 때, 서로 180도 방향이 반대인 두 방향이 모두 가능하다. 이는 물리적으로 루프 안테나에서 최대 진폭을 보여주는 방향이 안테나 면에 직교하는 두 방향이라는 점과 동일하다. 두 방향 중의 한 방향의 선택은 쌍극자 안테나에 수신된 신호를 이용함으로써 가능하다. 상기한 방법으로 결정된 입사각과 (1)식을 이용하여 계산된 $s(t)$ 와 쌍극자 신호 $e(t)$ 의 벡터 내적이, 즉 (6)식의 값이 양이면 두 신호가 동상임을 나타내고 계산된 α 가 입사각에 대응된다는 것을 의미하며, 만약 음이면 서로 위상이 반대이어서 계산된 α 에 180도를 더해 주어야 한다.

$$\sum e_i s_i = \sum e_i x_i \cos \alpha + \sum e_i y_i \sin \alpha \quad (6)$$

루프 안테나에 수신된 시계열 신호에 일정 길이의 윈도우를 순차적으로 이동하면서 (5) 및 (6)식을 이용하여 방위각을 계산함으로써, 방위각을 자동 계산할 수 있다. 독일 연방지질자원연구소에서 개발된 방향탐지 안테나는 두 개의 루프 안테나와 1개의 쌍극자 안테나로 구성되어 있기 때문에 (Dürbaum et al., 1986) 상기한 알고리즘의 적용이 가능하다. 그러나 한국자원연구소 보유의 RAMAC 시스템의 방향탐지 안테나는 실제로는 서로 직교한 두 루프 안테나가 아니라 4개의 로드 안테나(rod antenna)로 구성되어므로, 이로부터 루프 안테나 및 쌍극자 안테나 신호를 합성하여야 한다.

사각 루프 안테나에서 얻어지는 신호는 루프를 이루는 사각형의 각 변에 감지된 신호의 폐회로 적분과 등가이다. RAMAC 방향탐지 안테나는 루프 안테나를 구성할 수 있는 사각형의 윗변과 아랫변에 해당되는 부분은 없다. 그러나 시추공 안테나 축 방향으로 매우 긴 형태를 나타내므로, 폐회로 적분에서 사각 루프 안테나에서 윗변과 아랫변에 대한 부분은 무시하여도 무방하다. 그러므로 임의의 두 로드 안테나가 이루는 면으로 정의되는 루프 안테나의 합성 신호는 두 로드 안테나 신호의 차로써 정의할 수 있을 것이다. RAMAC 방향탐지 안테나를 형성하는 4개의 로드 안테나로부터 6종류의 루프 안테나 신호를 합성할 수 있다. 상기한 알고리즘은 한 쌍의 서로 직교하는 루프 안테나 신호를 이용한다. 그러므로 우리는 6종류의 루프 안테나 신호로부터, 5쌍의 서로 직교하는 루프 안테나를 상징할 수 있다. 이들 5쌍의 루프 안테나 신호로부터 상기한 알고리즘을 이용하여 반사파의 방위각을 결정하고, 결정된 방위각의 신뢰도를 높이기 위하여, 이들을 평균하여 사용하였다.

한편 로드 안테나는 쌍극자 안테나의 일종이므로, 그 자체를 하나의 쌍극자 안테나로 간주할 수 있다. 합성된 쌍극자 안테나 신호의 S/N 비를 향상시키기 위하여 4개의 로드 안테나에 수신된 신호를 더하여 사용하였다.

반사체의 방위각은 방향탐지 안테나를 구성하는 루프 안테나(loop antenna) 사이의 미세한 진폭 및 위상차로부터 계산될 수 있다. 반사체의 방위각 추출은 신호처리를 거치지 않은

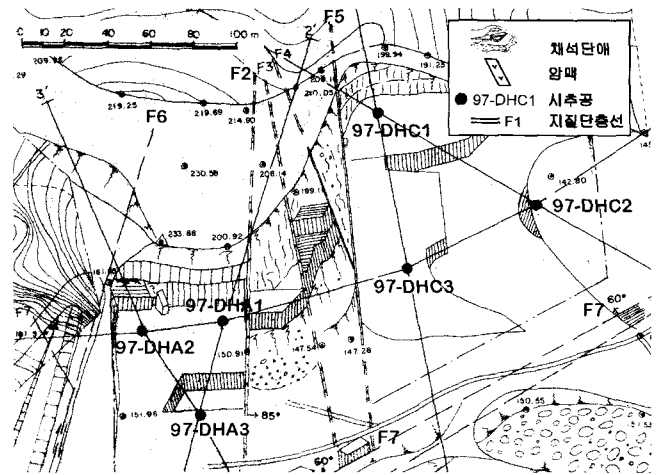


Fig. 5. Location map of surveyed boreholes and geological lineaments.

현장자료 만으로도 가능하다. 그러나 방향탐지 안테나는 그 수신 효율이 쌍극자 안테나에 비하여 떨어지므로 상대적으로 잡음이 많이 함유된다. 그러므로 최소한의 적절한 신호처리를 거침이 바람직하다. 방향탐지 안테나 탐사자료에 대해서 신호처리 기법을 적용하고자 할 때에는 그 신호처리가 위상에 대한 정보를 파괴시키는데 대하여 반드시 확인하여야 한다.

현장 탐사자료에 대한 적용 - 석산 탐사

본 장에서는 현장 탐사자료를 이용하여 얻어진 방향탐지 안테나 영상과 지표 지질조사 결과를 대비하여 봄으로써 본 연구에서 개발된 알고리즘의 타당성을 입증하고자 한다. 사용된 방향 탐지 안테나 탐사자료는 경기도 포천군 영중면 가사리 소재 동아석재 광산 지역에서 획득된 것으로, 탐사의 목적은 가행 석산 내의 파쇄대 및 열극대의 공간 분포를 탐지하기 위함이었다(김정호 등, 1997). 조사지역은 Fig. 5의 중앙부에 표시한 남북으로 달리는 여러 조의 단층 열극대를 기준으로 동쪽(A 지역) 및 서쪽(C 지역)의 두 지역으로 구분될 수 있으며 대단히 신선한 화강암으로 구성되어 있다. 시추공 레이더 반사법 탐사는 본 연구에서 논하는 방향탐지 안테나 뿐만 아니라 쌍극자 안테나를 이용한 탐사 또한 수행되었는데, 이는 쌍극자 안테나 탐사자료가 방향탐지 안테나 자료보다 S/N 비가 높기 때문에 시추공에서 더 멀리 떨어진 부분까지 영상화가 가능하기 때문이다.

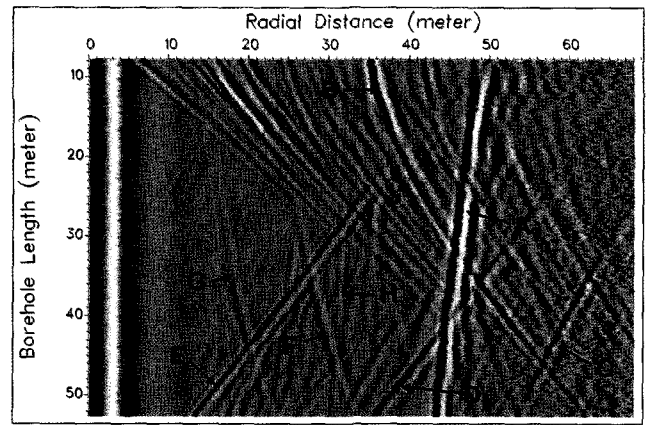
Fig. 6은 시추공 97-DHA2의 시추공 레이더 반사 영상으로, (a)는 쌍극자 안테나를 이용한 반사 영상이며, (b)는 방향탐지 안테나를 이용한 탐사자료에서 얻어진 방위각 정보를 보여주는 영상이다. 그림 (b)는 방향탐지 안테나 자료로부터 합성된 쌍극자 시계열 신호와, 본 연구에서 개발된 방법을 이용하여 자동 결정된 반사파의 입사 방위각을 이용하여 반사파들의 입사 방위각을 영상화시킨 것이다. 그림에서 위클 트레이스

(wobble trace)로 나타낸 부분은 합성 쌍극자 신호이며, 칼라를 결정된 방위각을 표시한다. 즉 그림에 스케일 바(scale bar)로 표시한 바와 같이 반사 이벤트가 청색일 경우 남쪽, 녹색은 서쪽, 황색은 북쪽, 그리고 적색은 동쪽이 된다. 레이더 파 도달시각 800 nsec. 정도에서 거의 수직인 방향으로 발달하는 반사층은, 적색으로 표시되어 있으므로 시추공의 동쪽에 위치하는 불균질대를 의미하는 것임을 알 수 있다.

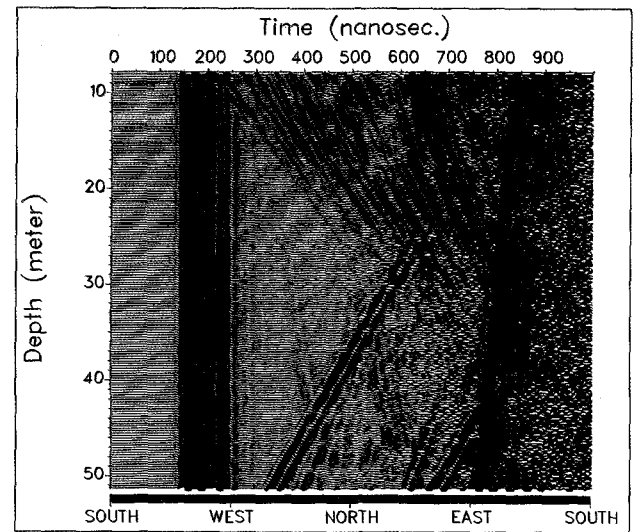
Fig. 6의 두 종류 안테나 영상은 전파거리에 따른 진폭의 감쇠를 보정해 주기 위한 이득보정(gain recovery), S/N 비를 높이기 위한 영위상 주파수 대역 필터 등을 모두 적용하였다. 또한 쌍극자 안테나 영상 (a)는 정확한 시추공으로부터의 거리에 대한 정보를 얻기 위하여, zero 시각 보정, NMO 보정 등의 자료처리 기법을 적용한 결과이다. 그러나 방향탐지 안테나 영상은 이러한 자료처리가 신호의 위상을 파괴시키기 때문에 적용하지 않았다. 따라서 동일한 반사층에서 반사된 반사파라고 하더라도 영상에서 표시된 위치가 약간 차이가 난다.

Fig. 7은 방향탐지 안테나로부터 얻은 탐사자료를 시추공의 북쪽을 기준으로 하여 0, 45, 90, 135도의 각도로 바라본 방향의 인공 합성 영상이다. 여기서 방위각의 증가 방향은 시계 방향이다. 그러므로 0도는 시추공을 원점으로 하여 북쪽, 45도는 북동쪽, 90도는 동쪽, 135도는 남동쪽을 의미한다. 루프 안테나의 원리상 180도 서로 다른 두 방향에서 최대의 진폭을 나타내므로, 0도에서 측정되는 반사 이벤트는 시추공을 중심으로 반사층의 방위가 남쪽 또는 북쪽 방향일 때 최대치를 가지며 90도에서 측정되는 반사 이벤트는 경사방향이 동쪽 또는 서쪽 방향 일 때 최대치를 가진다. 지금까지의 방향탐지 안테나 자료의 해석은 Fig. 7과 같이 화면상에서 여러 방위각에 대해 영상을 그려보고, 그 중 최대 또는 최소 반사 에너지를 나타내는 방위각을 결정한 후, 다시 합성 쌍극자 안테나 영상에서 나타나는 반사 이벤트의 위상을 비교하여 그 방위각을 결정하는 방법을 취하여 왔다. 그러나 Fig. 7에 나타나 있는 바와 같이 최대 또는 최소 반사 에너지를 갖는 방위각을 정확하게 결정하기가 어려우며, 모든 과정이 해석자의 시각에 의존하기 때문에 시간이 많이 소요된다. 그러나 본 연구에서 개발된 알고리즘을 이용한 Fig. 6(b)에서는 거의 대부분의 반사층에서 동일한 계열의 칼라를 보여주고 있으며, 이로서 쉽게 각 반사층의 방위각을 판단할 수 있다.

Fig. 6의 반사 이벤트들 중 가장 뚜렷하게 나타나는 것이 바로 A이다. 그 형태 및 시추공로부터의 거리등으로 미루어 보아 시추공의 동쪽에 위치하는 암맥 또는 그에 수반되는 열극대 F2(Fig. 5)에 의한 영상으로 추정될 수 있으나, Fig. 6의 (a), 즉 쌍극자 안테나 영상으로는 방위를 전혀 파악할 수 없기 때문에 확신할 수 없다. 그러나 방향탐지 안테나 영상 (b)에서는 적색 계열, 즉 시추공으로부터 동쪽에 위치하고 있음이 확연하게 나타나고 있으며 이로써 우리는 반사층 A가 바로 암맥 F2에 해당됨을 알 수 있다.



(a) Dipole antenna.



(b) Direction-finding antenna.

Fig. 6. Radar reflection images of 97-DHA2 using different antennas.

두 반사면 F, G는 경사각 80°에서 85° 정도의 급경사를 가지고 발달한다. 방향탐지 안테나 영상 (b)에서는 이들 두 반사 이벤트의 칼라가 약간 황색을 띤 녹색으로 나타나며, 시추공을 기준으로 하여 서쪽 내지는 서북서 방향에 위치함을 알 수 있다. 지표지질조사 결과를 모식적으로 함께 나타내고 있는 시추공 위치도 Fig. 5에는 시추공 97-DHA2의 서쪽에 북북동-남남서방향으로 단층선 F6이 존재함을 보여주고 있는데, 이들 F, G 두 반사 이벤트는 바로 이 단층선 및 그에 수반되는 열극대를 의미함을 알 수 있다. 또한 지표 지질조사 결과에서는 1개 조의 단층선이 존재하는 것으로 되어 있으나, 이와 같이 동일한 방향에서 두 조의 반사층이 비슷한 경사를 갖고 나타남은 F6 뿐만 아니라 지표에 드러나지 않은 또 다른 지질구조가 존재함을 의미한다.

Fig. 6에서 강한 회절파를 수반하는 B는 지하구조에 의한 것이 아니라 시추공 위치도에 모식적으로 나타낸 바와 같은 채석 단면에 의한 반사파이다. 방향탐지 안테나 영상 (b)에서 반사 이벤트 B가 뚜렷한 청색을 띠고 있으며, 실제의 방향을

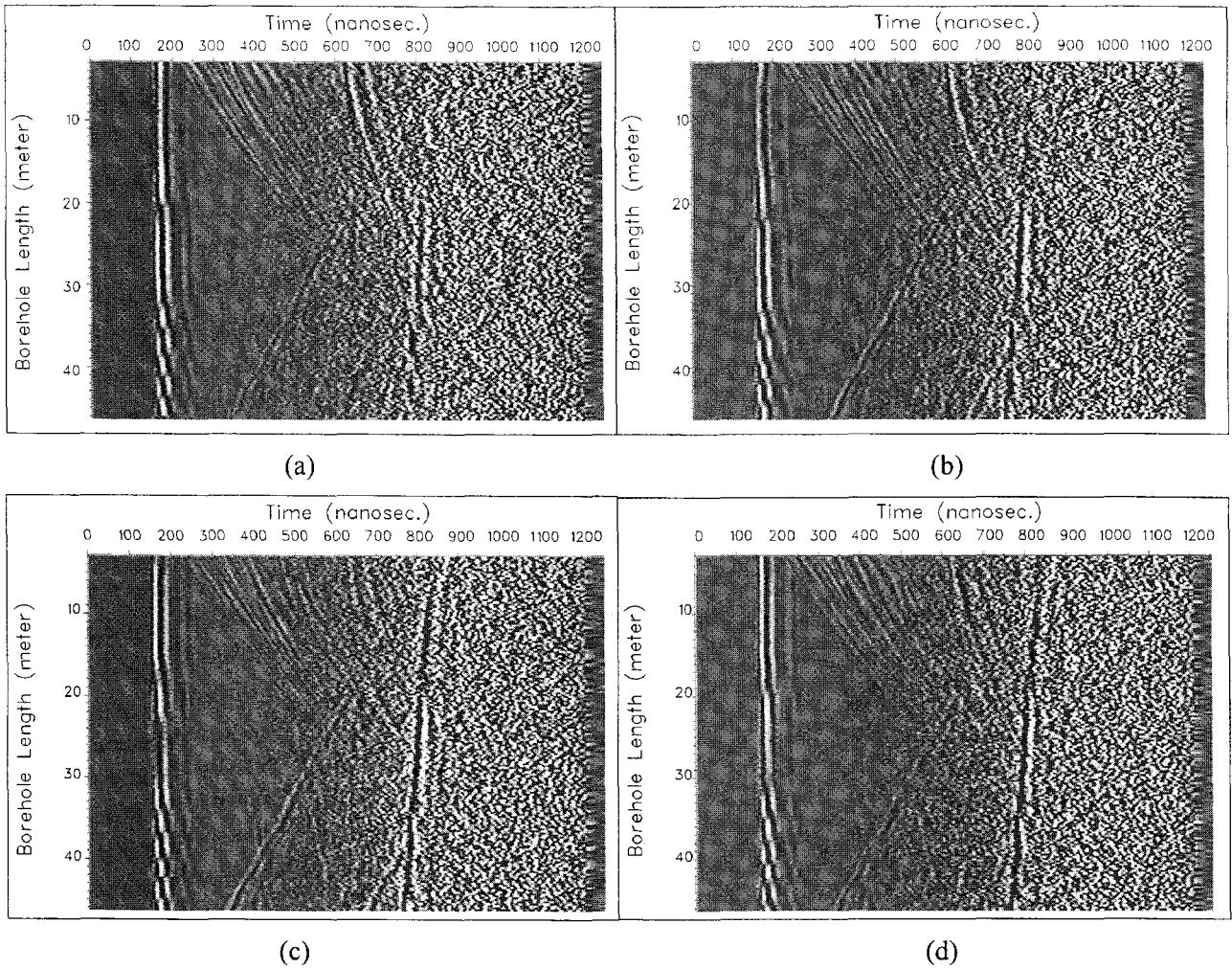


Fig. 7. Radar reflection images of directional antenna at borehole 97-DHA2. The azimuth of the radar image is (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, and (d) 135° from the Magnetic north, clockwise.

정확하게 지시하고 있음을 알 수 있다.

3조의 반사 이벤트 C, D, E는 모두 심부로 가면서 시추공에 가까워지는 방향으로 경사를 갖고 발달하는 반사층으로 지표에서 확인되지 않은 지하의 불연속면에 해당된다. 방향탐지 안테나 영상 (b)에서는 반사 이벤트 D 및 E의 칼라가 뚜렷하지는 않으나 청색에 가까운 녹색을 보여주며, 즉 이들 두 이벤트는 시추공에서 남서쪽 내지는 서쪽의 심부에 위치하고 있음을 알 수 있다. 반사층 C는 방향탐지 안테나 탐사 자료의 상대적으로 낮은 S/N 비 때문에 영상화되지 못하였다. 한편 반사 이벤트 H는 지하의 지질구조에 의한 반사 이벤트가 아니라, 시추공 97-DHA2의 동쪽에 위치하는 시추공 97-DHA1의 영상이며, 그 반사 에너지가 미약하여 Fig. 6(b)에서는 잘 나타나고 있지 않으나, 확대된 영상에는 희미하게 적색의 색조로 나타나며, 시추공의 방위와 잘 부합되고 있다.

Fig. 6(b)의 방향탐지 안테나 영상에는 동, 서, 남쪽의 다양한 방향으로부터 입사된 반사층의 영상이 혼재되어 있음을 나타내고 있다. 이러한 영상으로부터 원하는 어느 특정한 방

향에 대한 영상만을 따로 추출함이 가능하다. 즉 원하는 방향의 방위각을 갖는 반사파의 진폭만을 그대로 두고 나머지 방위각을 갖는 반사층의 진폭을 0으로 하여 제거함으로써, 특정 방향 영상을 얻을 수 있다. 조사지역에는 A, C의 두 지역으로 구분하는 단층대가 남북으로 달리고 있다. A 지역의 시추공을 기준으로 볼 때에 시추공의 동쪽에, C 지역의 시추공에서는 서쪽에 위치한다. Fig. 8은 A 지역 시추공 방향탐지 안테나 자료에서 동쪽 방향을, C 지역에서는 서쪽 방향을 나타낸 영상을 각각 추출하여 함께 그려본 것이다. 단층대의 경계부위에 있는 Fig. 5의 F2 및 F5 두 단층의 발달 양상을 확연히 보여준다.

결론

방향 탐지 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사 자료로부터 시추공을 중심으로 한 반사면의 방위각 결정을 위하여, 방위각 자동 결정 프로그램 및 반사 이벤트의 방위각

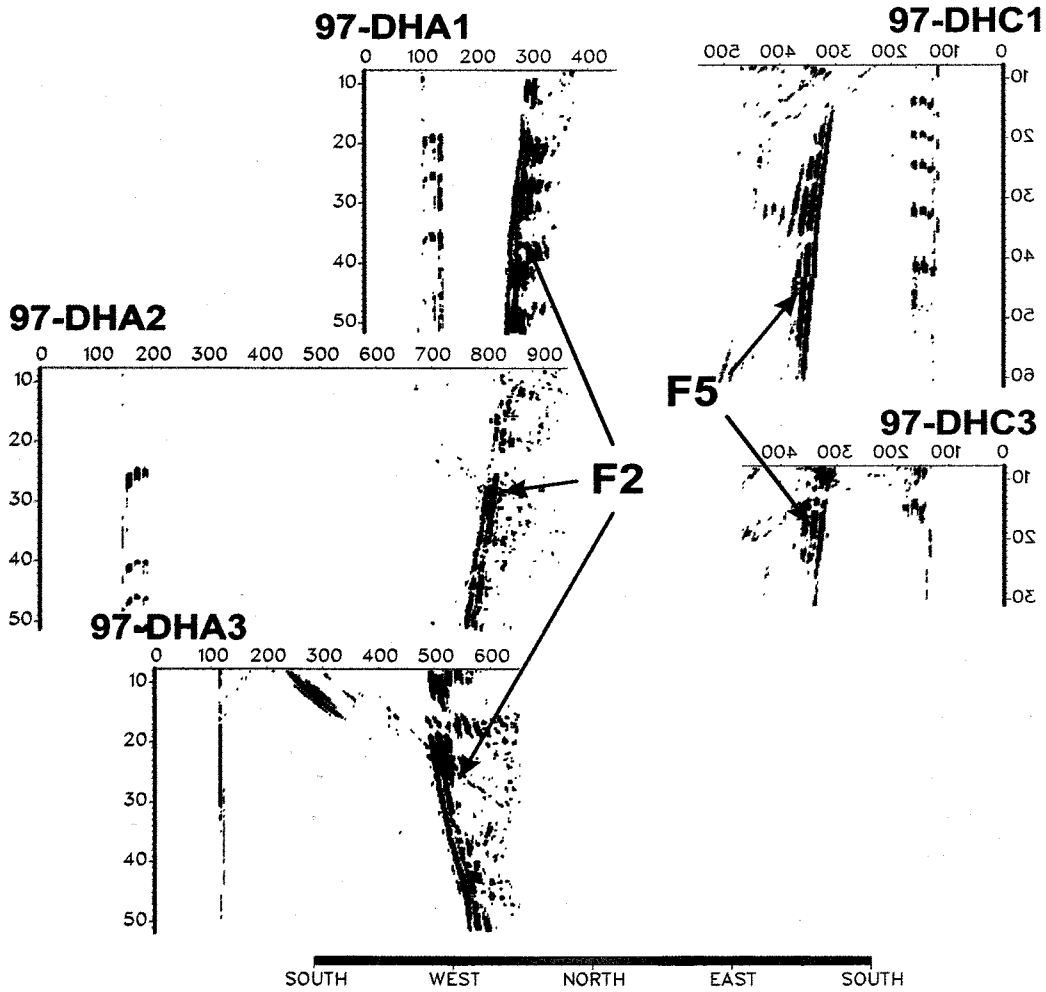


Fig. 8. East and west boundaries of fault zone by extracting the azimuthal components from the directional antenna data.

영상화 프로그램이 개발되었다. 본 연구의 목적은 기존의 방향탐지 안테나의 해석 방법이 매우 어려울 뿐만 아니라, 시간이 대단히 많이 소요되는 문제점을 해결하기 위한 것이었다.

본 연구에서 개발된 알고리즘의 정확도 및 효용성을 알아보기 위하여, 경기도 포천군 영중면 동아석재 광산에서 수행된 방향탐지 안테나를 사용한 시추공 레이더 반사법 탐사 자료를 처리하여 영상화하였다. 그 결과, 시추공 레이더 반사법 탐사에서 탐지된 거의 모든 불균질대에 대하여 3차원적인 위치를 결정할 수 있었다. 또한 지질조사 결과 확인된 단층 및 암맥, 그리고 지표에 인위적으로 존재하는 채석단면의 위치 등의 알려진 구조의 위치와, 방향탐지 안테나 영상에서 확인된 방위각과 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 이와 같이 본 연구에서 개발된 방위각 자동 결정 알고리즘을 이용하여, 지하 불균질대의 경사, 시추공으로부터의 거리, 그리고 방위각 등의 3차원적인 부존 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 영상 전 단면에 걸쳐 방위각을 자동 결정할 수 있기 때문에 특정 방향만을 분리하여 따로 영상화할 수 있다.

참고문헌

1. 김정호, 조성준, 이명종, 정승환, 이희일, 신인철, 1997, 화강암 석산 지역에서의 시추공 레이더 탐사 -경기도 포천군 동아석재-: 석재자원조사연구, 한국자원연구소.
2. Dürbaum, Weichart, H., Mundry, E., Thierbach, R., Ziekur, R., Nickel, H. and Sender, F., 1985, Erkundung unerschlossener Bereiche von Salzlagerstätten durch hochfrequente elektromagnetische Bohrchloßmeßverfahren: Archiv Nr. 98181, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, unpublished.
3. Mundry, E., Thierbach, R., Sender, F. and Weichart, H., 1983, Borehole Radar Probing in Salt Deposits: Sixth International Symposium on Salt, 1, 585-599.
4. Nickle, H. and Cerny, I., 1989, More effective underground exploration for ores using radio waves: The Bulletin of the Austrian Society of Exploration Geophysicists, 20, 371-377.
5. Olsson, O., Falk, L., Forslund, O., Lundmark, L. and Sandberg, E., 1990, Crosshole investigation - Results from borehole radar investigations: ABEM AB., Stockholm.
6. Sender, F. and Thierbach, R., 1987, Bohrloch-Reflexionsradar mit Azimutaler Richtungsbestimmung: KTB Report 87-2, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.