

이방성 레이다 시추공 토모그래피와 그 응용

김정호¹⁾, 조성준¹⁾, 이명종¹⁾

Anisotropic radar crosshole tomography and its applications

Jung-Ho Kim¹⁾, Seong-Jun Cho¹⁾ and Myeong-Jong Yi¹⁾

요약: 우리나라의 지질은 화강암과 편마암이 주를 이루나 시추공 레이다 토모그래피 탐사자료에서 이방성이 나타나는 것은 드문 일이 아니며 심지어는 결정질 암반에서 나타나기도 한다. 이방성 문제를 해결하기 위해 불균질 타원형 이방성 매질을 가정하여 토모그래피 역산 알고리즘을 개발하였으며, 이를 계속적으로 개량하여 왔다. 개발된 알고리즘에 의한 역산 결과는 세 종류의 변수, 즉 최고속도, 최저속도, 대칭축 방향의 세 종류의 토모그램으로 영상화할 수 있다. 이 논문에서는 먼저 개발된 알고리즘에 대하여 논의하고, 국내에서 수행한 4가지의 이방성 레이다 토모그래피 탐사 사례에 대해 소개한다. 전반부의 두 사례는 토목 구조물의 건설을 위한 지반조사의 일환으로 수행한 사례로서, 주 목적은 석회암 용식공동의 탐지에 있었다. 후반부의 두 탐사 사례는 결정질 암반인 편마암과 화강암 지역에서 수행한 사례이다. 이들 4가지 사례에서 이방성을 야기하는 원인은, 화강암 지역에서 수행한 사례에서는 미세 열극이 일정한 방향으로 배열함에 있었으며, 나머지 석회암과 편마암 지역에서의 사례는 특정광물이 일정한 방향으로 배열함에 있었다. 이들 이방성 토모그래피 탐사 사례에 대한 논의를 통하여, 지하 매질이 이방성을 띠는 경우, 이방성의 분포는 지하의 상태 변화를 이해하는 데에 매우 중요한 역할을 하며, 이방성 분포 자체가 매우 중요한 정보라는 결론을 얻을 수 있었다. 특히 최고속도와 최저속도의 차이를 최고속도로 정규화한 값으로 정의한 이방성 계수와 대칭축 방향은 이방성 토모그래피 영상을 해석함에 매우 유용함을 확인하였다.

주요어: 시추공 레이다 토모그래피, 이방성, 이방성 계수, 석회암 공동

Abstract: Although the main geology of Korea consists of granite and gneiss, it is not uncommon to encounter anisotropy phenomena in crosshole radar tomography even when the basement is crystalline rock. To solve the anisotropy problem, we have developed and continuously upgraded an anisotropic inversion algorithm assuming a heterogeneous elliptic anisotropy to reconstruct three kinds of tomograms: tomograms of maximum and minimum velocities, and of the direction of the symmetry axis. In this paper, we discuss the developed algorithm and introduce some case histories on the application of anisotropic radar tomography in Korea. The first two case histories were conducted for the construction of infrastructure, and their main objective was to locate cavities in limestone. The last two were performed in a granite and gneiss area. The anisotropy in the granite area was caused by fine fissures aligned in the same direction, while that in the gneiss and limestone area by the alignment of the constituent minerals. Through these case histories we showed that the anisotropic characteristic itself gives us additional important information for understanding the internal status of basement rock. In particular, the anisotropy ratio defined by the normalized difference between maximum and minimum velocities as well as the direction of maximum velocity are helpful to interpret the borehole radar tomogram.

Keywords: borehole radar tomography, anisotropy, anisotropy ratio, limestone cavity

1) 한국지질자원연구원 지반탐사연구실(Engineering Geophysics Group, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)
E-mail: jungho@kigam.re.kr

1. 서론

시추공과 시추공 사이를 스캐닝(scanning)함으로써 지하의 고분해능 영상을 획득하는 토모그래피 기법의 발전은 토목, 자원, 환경 등의 다양한 분야에서의 필요성에 의한 결과이다. 토모그래피 탐사 기술은 탄성파의 전파 및 감쇠 현상을 이용하는 탄성파 토모그래피에 의하여 선도되었으나, 전기비저항 및 유전율과 같은 전기적인 물성의 영상의 필요성에 의하여 전기, 전자 토모그래피 기술로 확대되었다. 전기, 전자 토모그래피 탐사법 중 주파수가 가장 높은 전자파의 전파 현상을 이용하는 레이더 토모그래피는 파동의 전파 및 감쇠, 굴절을 이용하는 방법이므로 그 원리에 있어서는 토모그래피 탐사의 원조격인 탄성파 토모그래피와 동일하다고 볼 수 있을 것이다. 레이더 파는 기반암의 전기비저항이 높을수록 멀리 전파되므로 전기비저항이 높을수록 그 적용성이 높다. 우리나라의 지질은 주로 전기비저항이 높은 화강암과 편마암으로 구성되어 있으므로 레이더 탐사에, 특히 시추공 레이더 탐사에 비교적 적합한 조건을 갖추고 있다. 시추공 레이더 탐사법은 국내에서는 1990년대 중반부터 지반조사(Kim *et al.*, 2004), 기반암의 수리지질학적 특성의 규명, 지하공동 탐사(김정호 등, 1999), 석산 탐사(Kim *et al.*, 1998; Seol *et al.*, 2002) 등의 분야에 활발히 응용되고 있다.

시추공 레이더 토모그래피는 레이더파의 감쇠, 전파속도로 지하 물리적 특성의 분포에 대한 정보와 영상을 제공한다. 대부분의 토모그래피 탐사자료의 처리 및 해석은 지하의 물질이 등방성이라는 가정에서 출발한다. 지하의 구성물질은 엄밀한 의미에서 등방성이라고는 할 수 없으나 대부분의 경우 이방성이 매우 미약하므로 이와 같은 가정은 대부분의 경우 큰 무리는 없다. 그러나 만약 지하의 구성물질이 무시할 수 없을 정도의 이방성을 띄고 있으나 자료처리 및 해석과정에서 이를 고려하지 않는다면, 그 결과로 얻는 토모그래피 영상은 실제의 구조와는 매우 다른 심각한 왜곡현상을 필연적으로 수반한다. 이는 근본적으로 토모그래피는 다양한 전파 경로와 전파각도를 이용하여 지하를 영상화하는 방법이며, 이방성을 띠는 경우 전파경로와 전파각도가 달라짐에 따라 물성이 달라지기 때문이다. 국내의 기반암이 주로 결정질 암반으로 구성되어 있음에도 불구하고 레이더 토모그래피 탐사자료에서 이방성이 빈번하게 나타난다. 이와 같은 이방성 문제를 해결하기 위하여 한국지질자원연구원의 전기전자탐사 연구팀은 레이더 이방성 토모그래피 역산 알고리즘을 개발하고 이를 계속적으로 개선하여 왔다. 이 논문에서는 개발한 이방성 토모그래피 알고리즘에 대하여 논의한 후, 국내의 이방성 토모그래피 적용 사례에 대하여 논의하고자 한다. 전반부에 논의하는 두 사례는 토목구조물의 건설을 위해 석회암 내부에 발달하는 용식 공동의 분포 조사의 목적으로 수행하였던 사례들이다. 후반부의 두 사례는 결정질 암반인 화강암과 편마암 지역에서의 이방성 토모그래피 탐사 예이다. 이와 같은 사례를 통하여 이방성이 지하 영상을 왜곡하는 어려운 난제가 아니라 이방성을 통하여 기반암 내부의 상태에 대한 더욱 많은 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 이방성 자체가 매우 유용한 정보임을 보이고자 한다. 이 논문에서 다루는 모든 탐사 사례의 자료들은 필자들에게 의해 개발한 레이더 탐사자료 전산처리 소프트웨어 패키지인 RADPRO와 TomoRAD를 이용하여 전산처리, 해석, 영상화 하였다.

2. 레이더 토모그래피

레이더 토모그래피는 고주파수(수십-수백 MHz)의 전자기파를 사용한다는 것을 제외하고는 탄성파 토모그래피와 거의 유사하다. 레이더 토모그래피 영상을 구하는 알고리즘에는 다양한

방법이 있으나, 탄성과 토모그래피와 마찬가지로 초기 도달파의 도달시각을 이용하여 지하의 속도 분포로써 영상을 얻는 도달주시 토모그래피(travel time tomography)와 초기 도달파의 진폭을 이용하여 지하의 감쇠율 분포로써 영상을 얻는 진폭 토모그래피(amplitude tomography)의 두 방법이 주로 동원된다. 진폭 토모그래피의 경우에는 송신 안테나 및 수신 안테나의 전자파 방사특성(radiation pattern)에 의해서 수신 전자파의 진폭이 달라지므로 송수신 안테나가 이루는 각도에 의한 방사특성이 고려된다(Falke *et al.*, 1988).

레이더 탐사는 전자파가 대상이므로 탐사의 기본이 되는 중요한 물성은 전기비저항 및 유전율이다. 지하에서의 전자파의 전파속도는 주로 유전율에 의존하며, 전자파의 감쇠는 주로 전기비저항에 의존한다. 따라서 속도 토모그램은 유전율 분포를, 감쇠 토모그램은 전기비저항 분포를 영상화 한 것으로 간주할 수 있다. 유전율의 변화는 신선한 기반암을 그 매질로 할 경우 물의 함량 및 공극율(porosity)에 의존한다. 일반적으로 파쇄대, 풍화대, 변질대 등은 거의 대부분 신선한 기반암에 비해서 수분의 함량이 상당히 높으며 점토광물이 수반되는 것이 보통이다. Table 1과 2에 나타낸 바와 같이 화강암 등의 신선한 암석의 유전율은 대부분 10 이하임에 반해, 물 및 점토의 유전율은 대단히 높으며, 따라서 수분 혹은 점토광물의 함량이 높은 부분은 레이더 전파속도가 현저히 감소된다. 암반의 전기전도도 또한 암석내의 수분과 점토광물의 함량에 비례한다. 따라서 레이더 파의 속도, 감쇠 토모그램 모두 암반의 신선도 또는 연약도를 영상화한 것으로 간주할 수 있다.

Table 1. Relative dielectric constant of typical Korean rocks in 10-20 MHz band (김정호 등, 1996).

Rock	Relative permittivity
Bulguksa granite	6.5 - 6.7
Daebo granite	6.1 - 6.4
Gneiss (⊥)	6.8 - 6.9
Gneiss (//)	6.3 - 6.4
Quartzite	5.1 - 5.2
Limestone	8.3 - 8.8
Shale (⊥)	25.0 - 28.0
Shale (//)	19.0 - 22.0
Hwangsang tuff (⊥?)	8.8 - 8.9
Hwangsang tuff (//?)	8.4 - 8.5

(⊥) : Measured along the bedding plane

(//) : Measured perpendicular to the bedding plane

Table 2. Relative dielectric constant of typical soil samples in 100 MHz band (Daniels, 2004).

Rock	Relative permittivity
Air	1
Asphalt dry	2-4
Asphalt wet	6-12
Clay dry	2-6
Clay wet	5-40
Concrete dry	2-12
Concrete wet	10-20
Fresh water	81
Fresh ice	4
Sand dry	2-6
Sand wet	10-30
Soil clay dry	4-10
Soil clay wet	10-30
Soil sandy dry	4-10
Soil sandy wet	10-30

Table 1은 10~20 MHz 대역에서 국내 암석의 상대 유전율을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 화강암, 편마암은 6에서 7 정도의 값을 보여 주며, 화강암이 편마암보다 약간 낮은 유전율을 갖는다. 가장 유전율이 높은 것은 셰일이며 매우 강한 이방성을 나타내고 있다. 또한 편마암과 황산 응회암의 경우 미약한 이방성을 가지고 있음을 알 수 있으며 이는 모두 엽리 혹은 층리와 같은 일정한 방향으로의 광물의 배열에 의한 것이다. 암석의 이방성은 서로 다른 광물이 일정한 방향으로 배열될 때에만 발생하는 것이 아니라 불순물 또는 열극이 일정한 방향으로 배열되어 있을 때에도 발생할 수 있다. 예를 들어 Table 1에서는 석회암이 등방성으로 나타나 있지만 균질하지 못할 경우 석회석 외의 점토성 광물 등과 같은 불순물이 일정한 방향으로 배열될 때에도 강한 이방성이 나타나며 이 논문에서 다루는 사례 1, 2가 그 예이다. 또한 결정질 암석으로써 이방성이 거의 나타나지 않을 것으로 예상되는 화강암의 경우에도 이와 같은 이방성이 나타날 수 있으며 사례 4는 그 예로써 열극이 일정한 방향으로 배열되어 있는 경우이다. 그러므로 단순히 암석의 종류로써 이방성의 유무를 판단함은 매우 위험한 일이며 항상 토모그래피 탐사 자료를 면밀히 관찰하여 이방성의 유무를 판단함이 중요하다.

3. 이방성 레이다 토모그래피 역산

이방성 매질에서의 시추공간 토모그래피 탐사자료의 역산은 탄성과 탐사 분야에서 광범위하게, 그리고 심도있게 연구되어 왔다. 탄성과 탐사에 비해 널리 사용된 역사가 비교적 짧은 레이다 탐사의 경우에서도 탐사자료에 나타나는 이방성에 대하여 계속적으로 보고되어 온 바 있다 (Tillard, 1994; Lesmes *et al.*, 2002; Seol *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2004). 이방성 토모그래피 역산에 대해서도 그다지 많지는 않으나 일부 연구자들에 의해 그 알고리즘이 발표되어 왔다. Vasco *et al.* (1997)은

미약한 이방성을 가정하여 이방성 역산 알고리즘을 개발하였으며 아이다호 국립 공학 실험실(Idaho National Engineering Laboratory)에서 현무암질 암석 내에 발달하는 파쇄대를 영상화하는 데에 성공적으로 적용하였다. Jung and Kim (1999)은 가장 간단한 이방성 모형인 타원형 이방성 매질을 가정한 이방성 토모그래피 역산 알고리즘을 개발하였으며 터널 굴착에 따른 주변 암석의 물성 변화를 조사하는 데에 성공적으로 적용한 바가 있다. Senechal (2000)은 이들의 연구와 달리 이방성에 의한 왜곡현상을 보정하여 적절한 토모그래피 영상을 구성할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

Fig. 1(a)는 사례 2의 토모그래피 탐사의 초기도달주시를 이용하여, 두 시추공 사이의 토모그래피 탐사자료의 겹보기 속도를 레이더 파의 전파 각도에 대하여 그린 그래프이다. 그림에서 전파각도 0는 수평으로 전파하는 경우, 즉 송신 안테나와 수신 안테나가 동일한 레벨에 있을 때를 의미한다. 음의 전파각도는 상향으로 전파될 때를 의미하며 이에 반해 양의 전파각도는 하향으로의 전파를 의미한다. 겹보기 속도 (average velocity)를 송, 수신 안테나 사이의 거리를 도달 주시로 나눈 값으로 정의하면, Fig. 1(a)의 잔여 속도(residual velocity)는 단면전체의 평균 속도에서 겹보기 속도를 뺀 값을 의미한다. Fig. 1(b)에서 알 수 있는 바와 같이 전파각도에 대한 겹보기 속도의 의존성을 타원체로 근사할 수 있으며, 따라서 이 지역의 기반암은 대칭축이 지표면에 나란하지 않은 불균질 타원형 이방성 물질(heterogeneous elliptic anisotropic medium)로 근사할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같은 현장자료에서 나타나는 특성에 기반을 두어 이방성 토모그래피 알고리즘을 개발하고 (Cho *et al.*, 1997; Jung and Kim, 1999), 이를 꾸준히 개선하여 왔다. 기본 알고리즘은 지하의 매질이 불균질 타원형 이방체로 근사 가능하다는 가정에 있다. 지하를 Fig. 2와 같이 격자형 셀로 분할하고 각 셀의 이방성을 최고 속도(V_{max}), 최저 속도(V_{min}), 그리고 대칭축 방향 (θ)의

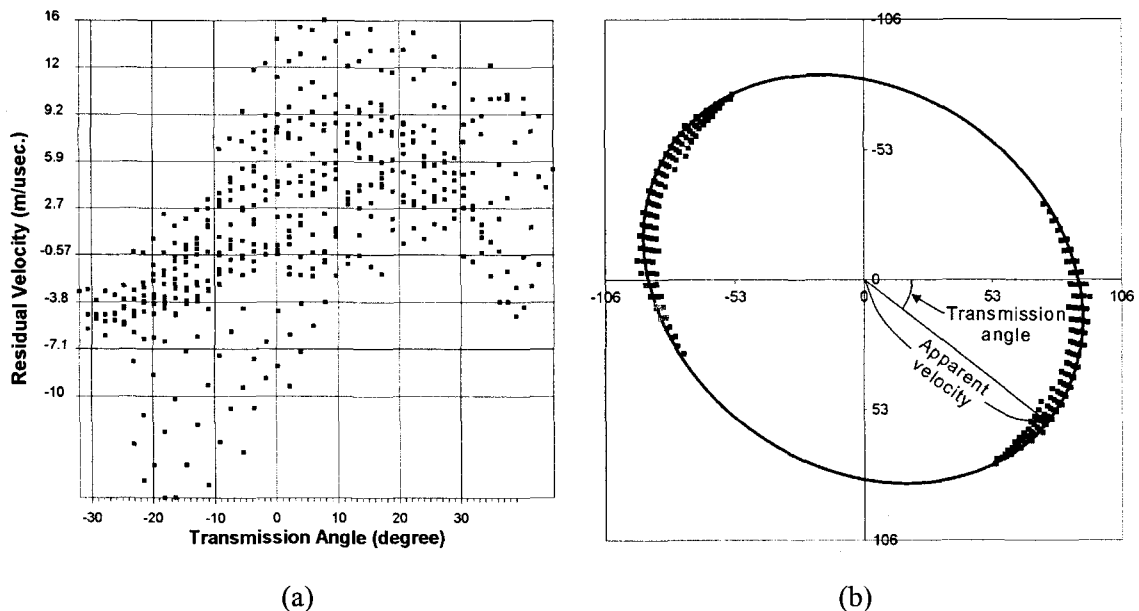


Fig. 1. (a) Residual velocity versus transmission ray angle, which shows velocity dependence on transmission angle clearly. (b) Polar presentation of apparent velocity distribution of the travel time data (a), which can be approximated with an ellipse. The radial distance of each data point is proportional to the apparent velocity, and the polar angle corresponds to the ray angle.

3변수로 정의한다. 따라서 이방성 토모그래피 역산은 측정된 도달주시로부터 토모그래피 단면을 형성하는 모든 셀의 3변수로 구성되는 다음 식 (1)의 변수 벡터를 구하는 문제로 귀착된다. 최종 역산 결과는 3종류의 물성을 이용한 토모그램, 즉 최고속도, 최저속도, 대칭축 방향 토모그램으로 영상화 된다.

$$\mathbf{p} = \{v_{\max}, v_{\min}, \theta\} \tag{1}$$

초기의 알고리즘은 Jung and Kim (1999)에 자세히 기술되어 있으나, 이에 부가하여 새로운 개념들을 계속 도입하였다. 최고 속도 혹은 최저 속도의 민감도(sensitivity)는 대칭축 방향의 민감도와는 확연히 다를 것을 예상할 수 있다. 또한 각 역산 변수의 분해능(resolution)은 각 셀의 공간 좌표에 의존할 뿐만 아니라 자료 획득 방법, 즉 ray coverage에도 크게 의존할 것임을 쉽게 예상할 수 있다. 예를 들어 토모그래피 단면상에서 최상부에 위치하는 셀들은 파동이 통과하는 빈도가 매우 낮으므로 그 분해 가능 정도가 상당히 낮을 것이며, 이에 반해 단면의 중앙 부위는 파동이 통과하는 빈도가 매우 높으므로 분해능이 매우 높을 것이다. 역산에서 이와 같은 점들을 고려하기 위해, 역산 변수의 분해행렬(resolution matrix)를 이용하여 공간적으로 변화하는 라그랑지 곱수(Lagrangian multiplier) 분포를 자동적으로 계산하는 ACB 법(Active Constraint Balancing technique, Yi *et al.*, 2003)을 채택하였다. 역산에 가하는 또 다른 제한으로써 이방성 정도를 최소화하는 제한을 도입하였다. 한편 레이다 탐사의 경우 측정 시간의 경과에 따라 기준 시각이 미세하게 변할 가능성이 높다. 이러한 문제를 해결하기 위해 송, 수신 안테나의 위치에 따른 정적 시간변화(static time shift)를 역산 변수화하여 기준 시각의 변화에 따른 문제점을 최소화하고자 하였다.

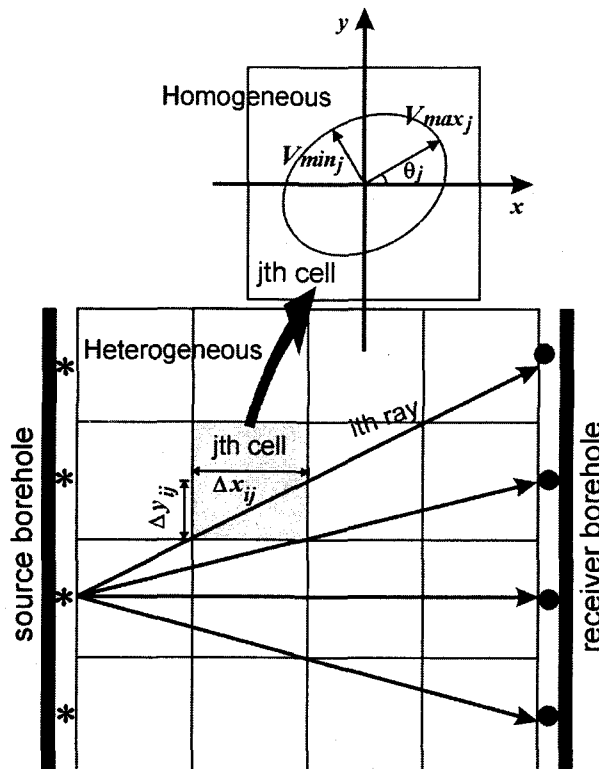


Fig. 2. A schematic diagram showing the principle of anisotropy tomography algorithm.

이와 같은 개념은 역산과정을 통해 최소화하고자 하는 다음의 목적함수(objective function)로 표현될 수 있다.

$$\Phi = \mathbf{e}^T \mathbf{e} + (\partial^2 \Delta \mathbf{v}_{\max})^T \Lambda_1 (\partial^2 \Delta \mathbf{v}_{\max}) + (\partial^2 \Delta \mathbf{v}_{\min})^T \Lambda_2 (\partial^2 \Delta \mathbf{v}_{\min}) + (\partial^2 \Delta \boldsymbol{\theta})^T \Lambda_3 (\partial^2 \Delta \boldsymbol{\theta}) + \lambda_4 (\Delta \mathbf{t}_s)^T (\Delta \mathbf{t}_s) + \lambda_5 (\Delta \mathbf{t}_r)^T (\Delta \mathbf{t}_r) + \lambda_6 (\Delta \mathbf{v}_{\max} - \Delta \mathbf{v}_{\min})^T (\Delta \mathbf{v}_{\max} - \Delta \mathbf{v}_{\min}) \quad (2)$$

여기서 벡터 \mathbf{e} 는 측정 도달주시와 이론적으로 계산된 도달주시 사이의 오차이며, \mathbf{t}_s 와 \mathbf{t}_r 은 각각 송신과 수신 안테나 위치에 대한 정적 시간변화 항에 대응된다. 6개의 상수항, λ_1 - λ_6 은 역산에 가한 각종의 제한을 제어하기 위한 라그랑지 곱수이다. 식 (2)에서 6종류의 라그랑지 곱수 중 처음의 3 라그랑지 곱수는 공간적으로 변화하는 라그랑지 곱수 분포를 표현하기 위해 모두 행렬로 표현되어 있다. 이 경우의 라그랑지 곱수 행렬 Λ 는 대각행렬, 즉 $\Lambda = \text{diag}(\lambda_i)$ 이다. 최고 및 최저 속도와 대칭축 방향에 대한 라그랑지 곱수 분포, 즉 라그랑지 곱수 행렬은 변수 분해행렬과 분산함수(spread function)로부터 자동적으로 계산할 수 있다(Yi *et al.*, 2003). (2) 식의 목적함수에서 마지막 항은 이방성 정도를 최소화하는 제한에 해당한다. (2) 식의 목적함수를 각 변수의 증분 벡터에 대해 미분함으로써 각 변수에 대한 최소자승 역산 방정식을 얻는다. 등방성 매질에서는 최고 및 최저 속도가 동일하므로 대칭축은 완전히 분해 불가능한 변수이다. 따라서 등방성 매질을 역산의 초기 모델로 채택하면 역산이 불안정해질 가능성이 높다. 이러한 문제점을 피하기 위해 먼저 3종류의 스칼라 변수로 구성되는 균질 이방성 매질을 가정한 역산을 수행하여 균질 이방성 모델을 구한다. 이를 초기 모델로 채택하여 식 (2)의 목적함수를 최소로 하는 3종류의 이방성 변수 벡터 \mathbf{v}_{\max} , \mathbf{v}_{\min} , $\boldsymbol{\theta}$ 와 두 종류의 정적 시간변화 벡터 \mathbf{t}_s , \mathbf{t}_r 을 구한다.

4. 사례 1- 석회암 공동의 탐지

석회석 광산의 대규모 분쇄기 건설을 위한 지반 조사 목적으로 GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사와 전기비저항 탐사가 수행되었다. GPR 탐사결과 당초 기대한 심도까지의 영상을 얻을 수 없음을 확인하였으므로 3공의 시추공을 시추하고 이를 이용하여 시추공 반사법 탐사와 레이다 토모그래피 탐사를 수행하였다. 시추공 레이다 탐사에 사용한 기기는 Mala Geoscience사의 RAMAC/Borehole 시스템이었으며 토모그래피 탐사에 사용한 안테나의 주 주파수는 20 MHz 이었다.

시추공 레이다 토모그래피 탐사에서 시추공 편차는 토모그래피 영상을 왜곡시킬 가능성이 있으며 특히 두 시추공 간격이 좁을 때에 더욱 가능성이 높아진다(Peterson, 2001). 이에 의한 문제점을 해결하기 위해 OWL사의 780 시스템을 이용하여 시추공 수직 편차를 측정하였으며 이를 이용하여 시추공의 수직 편차가 도달주시에 미치는 영향을 보정하고자 하였다. 토모그래피는 두 시추공에 의해 정의되는 평면을 기본 가정으로 하고 있으나, 실제의 시추공 편차는 3차원적으로 발생하므로 편차를 포함한 두 시추공은 2차원으로 묘사할 수 없다. 따라서 시추공 편차에 의한 효과를 도달주시에 다음에 서술하는 방법을 이용하여 보정함으로써 두 시추공이 가상의 2차원 평면상에 위치하도록 하는 방법을 채택하였다. 먼저 시추공 편차 자료를 이용하여 계산한 실제의 전파 거리와, 두 시추공이 완벽한 2차원 평면에 포함되는 경우의 가상의 전파거리의 두 종류의 전파 거리를 계산한다. 그리고 실제의 전파거리를 도달주시로 나눔으로써 겉보기 속도를 구한다. 실제와 가상, 두 종류의 전파거리의 차이와 겉보기 속도를 이용하

여 도달주시 보정량을 계산하며 이를 이용하여 도달주시를 보정한다. 이와 같은 접근방법은 매우 간단한 방법이며 단면상에서의 속도 변화를 감안할 수 없는 방법이기도 하나, 임의의 방향으로 휘어진 시추공에 의한 효과를 아무런 제약이 없이 효율적으로 보정할 수 있다는 장점이 있다. 이하 논의하는 사례의 도달주시 자료는 모두 이와 같은 시추공 편차 보정 방법을 이용하여 시추공의 편차 효과를 보정하였다. 사례 1, 2, 4의 경우에는 이와 같은 방법으로 보정한 자료와 보정하지 않은 자료의 토모그래피 영상 사이에는 주목할 만한 차이는 확인되지 않았다. 그러나 사례 3의 경우에는 두 종류의 영상 사이에 큰 차이가 존재함과 함께, 보정한 자료를 이용한 경우가 알려진 정보와 훨씬 더 잘 부합되는 적절한 영상을 얻을 수 있음을 확인 하였다. 이는 송, 수신 두 시추공 사이의 간격이 1.4 m 정도로 대단히 좁기 때문이며, 따라서 시추공 편차가 미치는 영향이 다른 사례에 비하여 매우 컸기 때문이다.

현장탐사 자료의 도달주시에서 심한 이방성이 확인되었다. Fig. 3은 그 예로써 송, 수신 안테나가 동일 레벨에 위치해 있기 때문에 전파거리가 가장 짧은 트레이스의 초기도달과가 전파거리가 긴 다른 트레이스들보다 오히려 더 늦게 도달하는 현상을 잘 보여주고 있다. 이 사례는 국내의 시추공 레이더 토모그래피 탐사에서 이방성이 확인된 최초의 경우이며 이방성에 의한 영상의 왜곡을 방지하기 위해 각종의 자료처리 방법을 실험하였다. 이를 위한 첫 번째 시도로써 균질 이방성 매질을 가정하고 이방성 효과를 제거하여 등방성 자료로 변환한 이후 등방성 토모그래피 알고리즘을 적용하여 보았다. 그러나 탐사목적에 만족할 만한 수준의 영상의 획득이 불가능하였다. 이에 따라 불균질 타원형 이방체를 가정한 역산 알고리즘을 개발하여 지하 영상을 구성하였다.

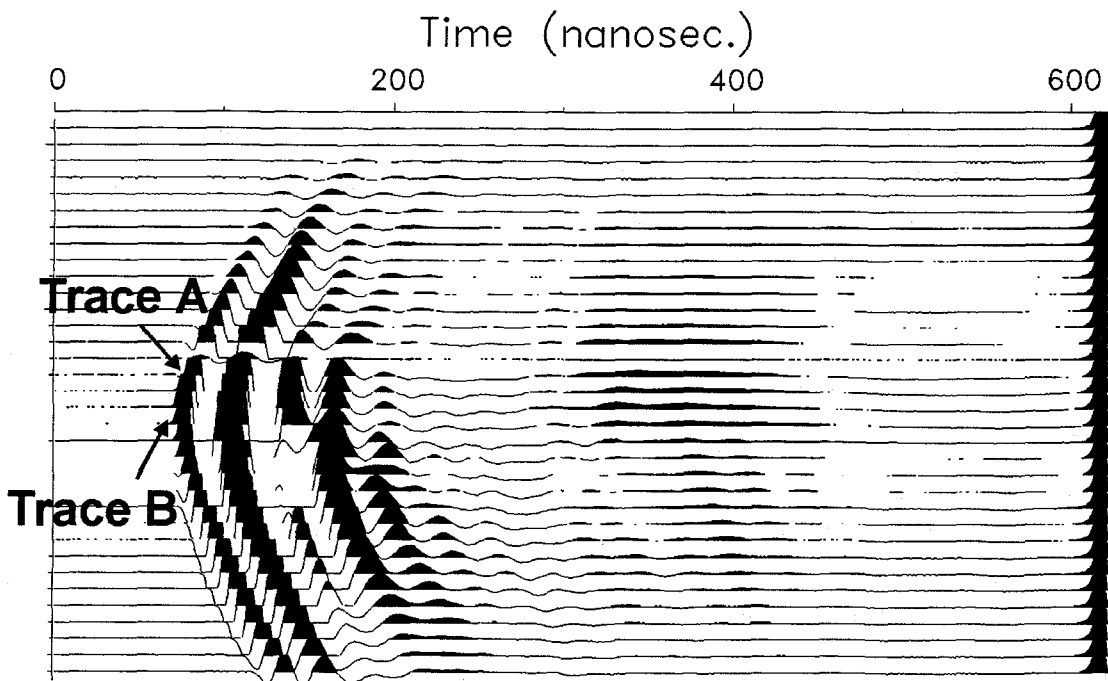


Fig. 3. A shot gather showing anisotropic effect. Trace A corresponds to the time series data having the shortest distance of wave propagation, while Trace B to that showing the fastest travel time.

Fig. 4는 동일한 자료에 대하여 여러 종류의 역산 알고리즘을 적용하여 획득한 영상들을 비교한 것이다. 등방성 토모그래피 역산 알고리즘을 기반으로 구성한 영상(Fig. 4(a))은 단순히 전파 각도에 대한 속도의 의존성만을 보여줄 뿐 지하구조를 전혀 반영하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이방성 효과를 보정한 이후 자료를 등방성 알고리즘으로 역산한 영상(Fig. 4(b))은 Fig. 4(a)에 비하여 약간 향상되어 있기는 하나 이방성 효과가 어느 정도 남아 있으며, 이에 의해 영상의 일부가 심하게 찌그러져 있음을 인지할 수 있다. Fig. 4(c)는 본 연구에서 개발된 기본 알고리즘을 이용한 결과로써 3종류의 이방성 변수 중 최고 속도로 지하를 영상화한 것이다. 다른 두 영상과 비교해 보면 이방성 효과가 완전히 사라지고 물성의 변화가 매우 잘 구현되어 있음을 알 수 있다. 두 단면을 연결한 경계부위에서도 이상대의 세세한 부분까지 잘 연결되어 이상대의 발달양상을 쉽게 파악할 수 있으며, 분해능도 가장 높음을 확인할 수 있다. 영상에서 완경사로 발달하는 두 조의 저속도 이상대는 그 내부에 공동의 배태 가능성이 매우 높은 파쇄대로 해석하였다. 시추공 BH-3의 30 m 심도에서 점토로 일부가 충전된 공동이 확인되었으며 이는 바로 심부의 저속도 이상대가 시추공과 교차하는 부분과 정확하게 일치한다. 시추공 레이더 반사법 영상과 이방성 토모그래피 영상의 복합해석 결과, 조사지역에는 다수의 공동과 수조의 연약대가 발달하는 것으로 나타났으며 이에 기초하여 조사지역의 지반 보강공사가 설계되었다.

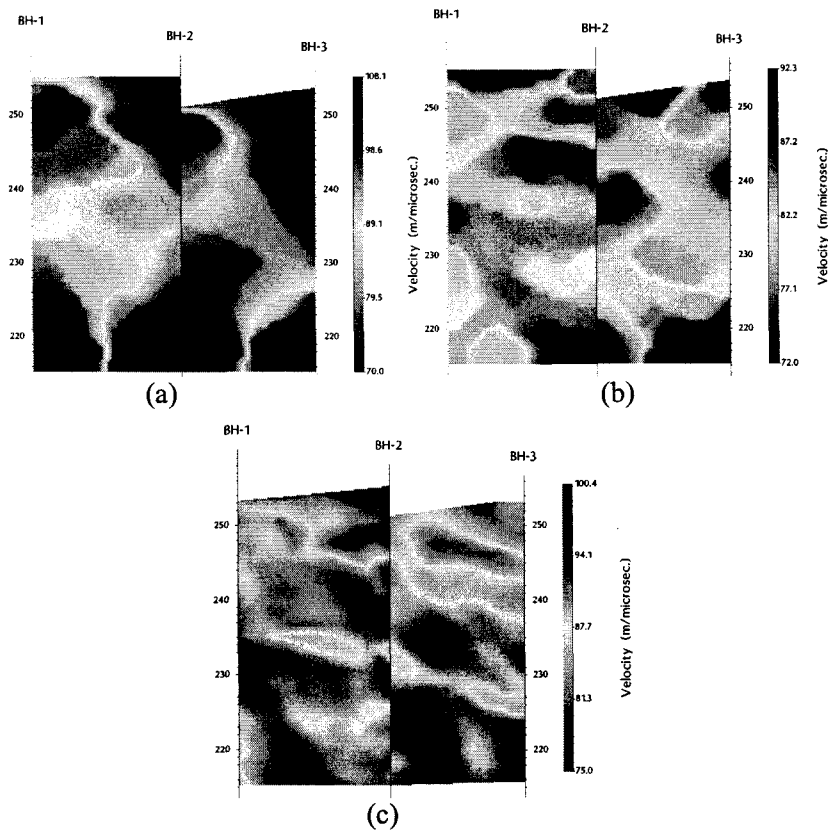


Fig. 4. This figure compares the georadar tomograms from different tomography inversion algorithms. (a) inversion based on isotropic velocity parameterization. (b) isotropic inversion after removing the anisotropic effects based on the assumption of a uniform anisotropy medium throughout the whole section. (c) anisotropic inversion based on a heterogeneous elliptic anisotropy model. The vertical axis annotates the elevation along the vertical borehole axis in meter.

5. 사례 2- 석회암 공동과 이방성 계수

국내의 석회암 지역에서 고속도로 교량 건설을 위한 터파기 공사 도중 수 개의 석회암 공동이 발견되었다. 이로 인해 건설될 교량의 안정성에 심각한 의문이 제기되어, 새로운 지반조사가 완료되고 이에 의한 새로운 보강 방안이 제시될 때까지 교량의 건설이 중단되었다. 지반조사를 위하여 전기비저항, GPR, 시추공 레이더 반사법 탐사, 레이더 토모그래피 탐사 등으로 구성된 종합적 물리탐사를 수행하였다. 탐사의 주 목적은 석회암 공동과 연약대의 분포를 파악하여 지반 보강법 설계를 위한 기본 자료를 제공함에 있었다. 시추공 레이더 탐사가 지하 공동의 분포에 대한 정보를 가장 정확하게 제공할 수 있을 것으로 예상되었으므로 각종의 물리탐사 방법 중 가장 중요한 위치를 차지하였으며, 석회암이 발달하고 있는 8개의 교각 부위에 집중되어 실시되었다. 시추공 레이더 탐사에 사용한 기기는 Mala Geoscience사의 RAMAC/Borehole 시스템이었으며 토모그래피 탐사에 사용한 안테나의 주 주파수는 20 MHz이었다.

조사지역에는 세립 판상 석회암이 주로 분포하며 부분적으로 석회질 세일이 협재하기도 한다. 조사한 8개의 교각 중, 6개의 교각 하부에서 얻어진 토모그래피 도달주시 자료에서 이방성이 발견되었다. 이방성은 바로 석회암 내부에 동일한 방향으로 배열한 층리 때문이며, 레이더 파가 층리면에 나란한 방향으로 전파될 때에 빠른 속도로 전파되는 것으로 나타났다.

주 관심사인 석회암 공동은 그의 충전 물질에 따라 속도 토모그램에서 고속도 이상대로도, 혹은 저속도 이상대로 영상화 될 수 있다. 즉 공기로 충전된 공동의 경우에는 공기의 전자기파 속도가 가장 빠르므로 고속도 이상대로, 물이나 점토로 충전된 경우에는 이들 충전물질의 전파 속도가 석회암보다 훨씬 낮으므로 저속도 이상대로 영상화 될 것이다. 시추공 레이더 탐사를 위한 시추에서 많은 공동이 발견되었으며 그들은 모두 물 과 점토로 충전된 상태이었다. 그러므로 이 지역에서의 지하공동은 속도 토모그램 상에서 저속도 이상대로 영상화되어야 할 것이다. 한편 지하매질이 이방성을 띠는 경우에, 그의 일부가 풍화, 변질 또는 파쇄가 진행된다면 이 지역의 이방성의 원인인 층리의 배열 정도가 약화되어 이방성의 정도가 낮아질 가능성이 매우 높다. 뿐만 아니라 공동의 경우 충전물질인 공기, 물, 점토는 모두가 등방성물질로 간주할 수 있으므로, 이방성 계수(anisotropy ratio)를 영상화 할 수 있다면, 이방성 계수 영상에서 낮은 이방성을 갖는 이상대로 나타나야 할 것이다.

위의 추론에 의해서 이 지역에서 지하공동이 발달하는 부분은 낮은 전파속도와 낮은 이방성을 동시에 보여주는 부분으로 토모그램상에 영상화될 것이다. 이 연구에서는 이방성의 정도를 정량화하기 위한 이방성 계수를 다음 식과 같이 최고속도와 최저속도의 차이를 최고속도로 정규화한 값으로 정의하였다.

$$\text{Anisotropy ratio}(\alpha) = \frac{|v_{\max} - v_{\min}|}{v_{\max}} \quad (3)$$

이 지역의 이방성 토모그램의 예인 Fig. 5를 관찰하면 토모그램의 최상부가 모두 낮은 이방성 계수를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이는 위의 추론을 뒷받침하고 있다. 또한 P8-R의 시추 과정에서 많은 공동이 확인되었으며 심도 6~14 m 구간은 다수의 공동이 확인된 부분이며 18~19 m 구간 또한 공동을 확인한 구간이다. 이 두 구간 모두 저속도와 낮은 이방성 계수를 보이고 있다. Fig. 5(a)에서 “Zone B”로 표시한 영역 내부의 “Cavity 2”와 “Cavity 3”은 속도가 약간 낮을 뿐 아니라 이방성이 매우 낮다는 점에서 공동 또는 공동 밀집영역으로 해석한 부분이다. “Cavity 4”와 “Cavity 5” 또한 국부적으로 약간 낮은 속도와 함께 이방성이 낮게 나타나

기 때문에 공동으로 해석하였다. 시추공 레이더 반사법 영상에서 고립된 반사체가 발달하는 부분이 대부분 이들 이상대들에 대응될 수 있다는 점이 이와 같은 해석을 뒷받침한다.

Fig. 5는 교각 하부 암반 내의 레이더 파 전파속도가 일정한 공간적인 경향을 가지며 분포한다는 것을 보여주고 있다. 즉 P8-L 쪽에는 고속도대가, P8-R 쪽에는 저속도대가 주로 분포하며, 이 저속도대는 P8-L에서 P8-R 방향으로 가면서 경사져서 심부로 발달하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 경향은 인접한 다른 교각의 최대 속도 토모그램에서도 공통으로 나타나는 현상이다 (Fig. 6). 공동 또한 교각 5를 제외하고는 모두 저속도대에 밀집하여 발달한다. Fig. 4(a)에서 도시한 바와 같이 레이더 파 전파속도와 RQD 값이 밀접한 상관관계를 보이고 있으며 따라서 낮은 레이더 파의 전파 속도는 상대적으로 연약한 암반을 의미한다. 이와 같이 교각의 한쪽 방향에 연약암반과 공동이 집중되어 분포하며 한쪽 방향은 항상 비교적 신선한 암반이 발달한다는 점을 고려하지 않고 교각을 건설한다면, 한쪽 노선이 지극히 불량한 암반 위에 기초됨에 반하여 다른 한쪽노선은 상대적으로 양호한 암반 위에 위치하므로 부등침하가 발생할 가능성이 높다.

이 사례는 지하의 매질이 이방성을 띠는 경우에 이방성 자체가 지하매질 상태에 대한 중요한 정보를 제공하여 줄 수 있음을 잘 보여 주고 있다. 지하 매질이 등방성일 경우에는 전파속도의 높고 낮음이라는 단 한 개의 지시자에 의해 이상대가 공동인지를 해석하여야 한다. 그러나 이방성을 띠는 경우에는 전파속도와 이방성 계수라는 두 종류의 해석 지시자를 이용하여 이상대를 해석할 수 있으므로, 지하가 등방성인 경우보다 오히려 신뢰도가 높은 해석을 기할 수 있을 것이다. 그러므로 지하 매질이 이방성을 띠는 경우에는 그 이방성이 지하 영상을 왜곡시키는 존재가 아니라, 오히려 지하에 대한 좀 더 많은 정보를 얻을 수 있는 현상으로 간주하여야 할 것이다.

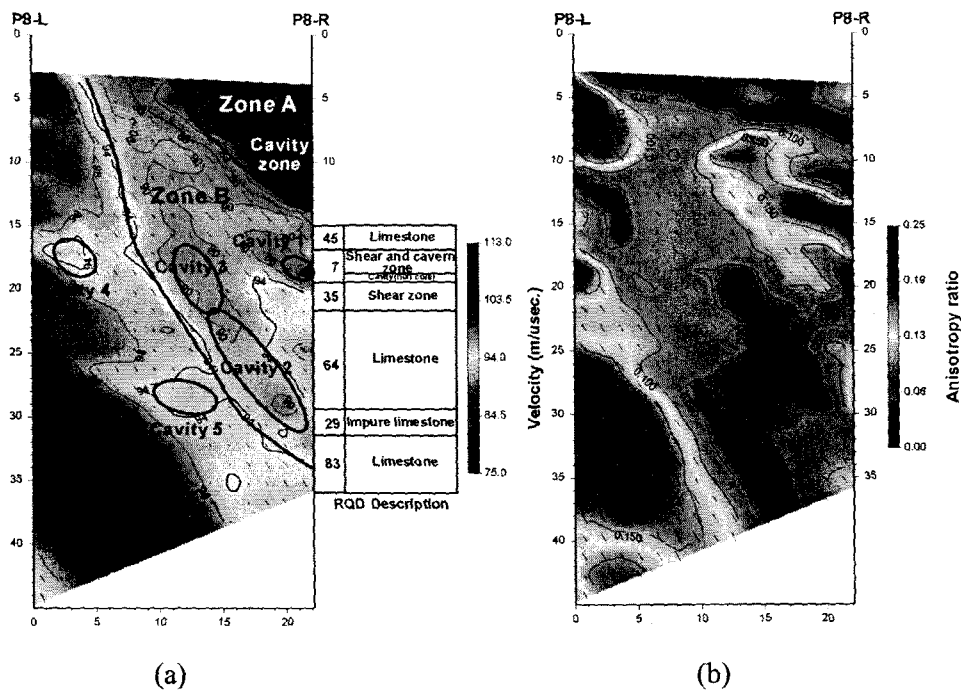


Fig. 5. Tomograms of maximum velocity (a), and anisotropy ratio (b). The oblique short line in a tomogram points in the direction of maximum velocity and its length represents the anisotropy ratio. Note that the RQD (Rock Quality Designation) attached to the borehole axis of P8-R is matched fairly well with the velocity distribution.

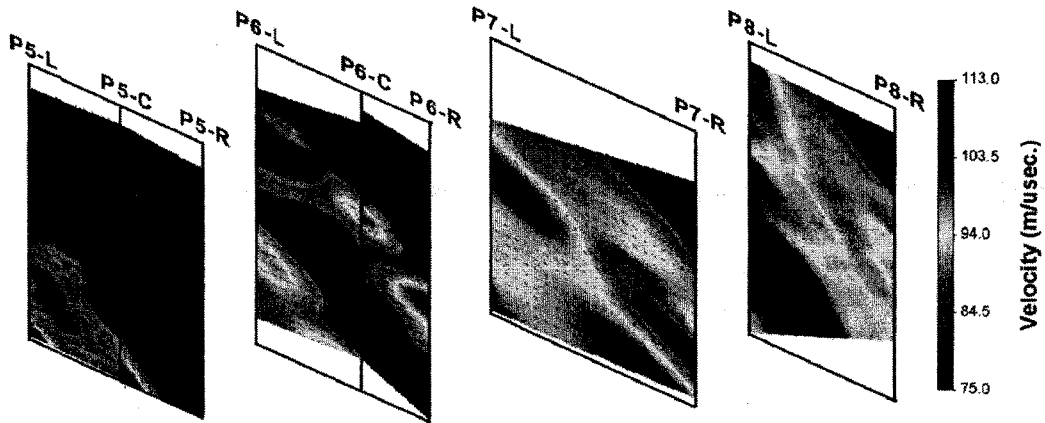


Fig. 6. Comparative display of the maximum velocity tomograms beneath Piers 5, 6, 7, and 8.

6. 사례 3- 터널 굴착에 따른 암석 물성의 변화 모니터링

경기도 용인시에 위치하는 현대건설(주) 기술연구소 지하암반 실험장에서, 터널의 굴착 이전과 이후에 시추공 레이더 탐사를 수행하여 레이더 파 전파속도의 변화를 비교함으로써 터널 굴착에 따른 암반 상태의 변화를 탐지하고자 하였다(Jung and Kim, 1999). 굴착될 터널에 나란하게 4공의 수평 시추공을 굴착 이전에 시추하였으며 시추공간의 간격은 약 1.4 m 정도이다(Fig. 7). 4시추공을 이용하여 터널 굴착 이전과 이후에 시추공 레이더 토모그래피 탐사를 수행하였다. HP8753 네트워크 분석기(network analyzer)를 이용하여 주파수 영역에서 탐사자료를 획득하였으며, 사용한 안테나의 중심 주파수는 500 MHz이다. 송, 수신 안테나의 이동간격은 공히 0.3 m이었으며, 한 송신 안테나 위치에 대해 11개의 트레이스를 획득하였다. 송, 수신 시추공 간격이 대단히 좁으므로 시추공 편차에 의해 토모그래피 영상이 왜곡될 가능성이 매우 높다. 이를 위해 노르웨이 Devico사가 Eastman 시추공 편차 측정 시스템(Eastman Multiple Shot Survey Instrument)을 이용하여 획득한 편차측정 자료를 바탕으로 시추공 편차에 의한 효과를 보정하였으며 보정 방법은 사례 1에서 설명한 바와 같다.

기반암은 흑운모와 각섬석이 우흑대를, 장석과 석영이 우백대를 이루며 교호하여 발달하는 호상 흑운모 편마암이 주를 이루고 있다. 이 호상 편마암 이외에 열수변질을 받은 편리가 잘 발달한 흑운모 편암이 일부 발달한다. 측정한 도달주시에는 이방성이 나타났으며, 이 지역의 이방성은 이와 같이 편마암과 편암 내에 광물이 일정한 면으로 배열된 엽리와 편리 때문인 것으로 해석하였다.

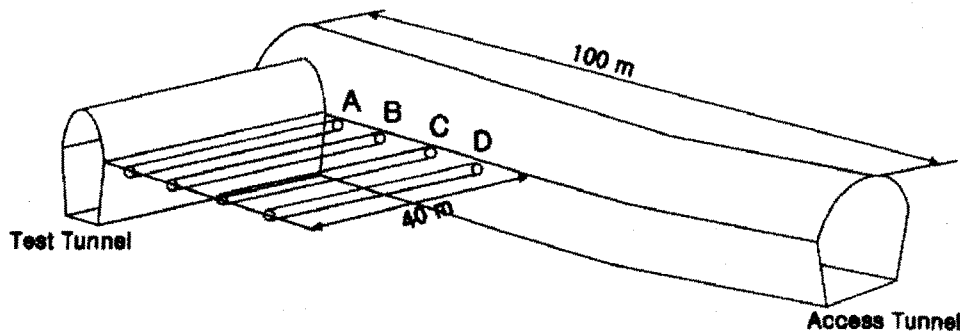


Fig. 7. Schematic diagram of horizontal boreholes drilled parallel to the test tunnel

Fig. 8은 4개의 시추공이 형성하는 3개의 최고속도 토모그램을 연결하여 함께 나타낸 영상이다. 사례 1의 Fig. 4(c)의 영상과 비교하면 각 단면을 연결하는 시추공 부근에서 속도의 연결성이 상대적으로 약간 더 불량한 것을 발견할 수 있다. 이는 시추공 사이의 간격이 매우 좁기 때문에 비록 편차에 의한 영향을 보정하였다고는 하나 겉보기 속도에 기반을 두고 보정한 것이기 때문에 그 영향이 어느 정도 남아 있는 결과로 생각된다. 시험 터널 굴착 이전과 이후를 비교하면 뚜렷한 전파속도의 변화는 관찰되지 않는다. 그러나 이방성의 방향이 약간 달라졌으며, 전자기파의 전파속도도 전반적으로 약간 낮아져 있을 뿐만 아니라 저속도 영역이 약간 더 확대되어 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 이방성 계수 또한 전반적으로 변화하였음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 새로운 터널 굴진에 의하여 발달된 미세 균열 내에 포화된 지하수에 의한 것으로 해석된다. 특히, 시험 터널에 가장 가까이 시추한 시추공 A와 B 단면에서 전파속도와 이방성 계수는 다른 단면에 비하여 현저하게 낮아져 있다. 이와 같은 속도와 이방성 계수의 감소는 터널 굴착에 의한 미세 균열이 터널에 가장 가까운 부위에 가장 많이 형성되었기 때문으로 해석하였으며, 따라서 터널에서 멀리 떨어진 부분에 비해 상대적으로 함수비가 더 높아진 영향으로 해석하였다.

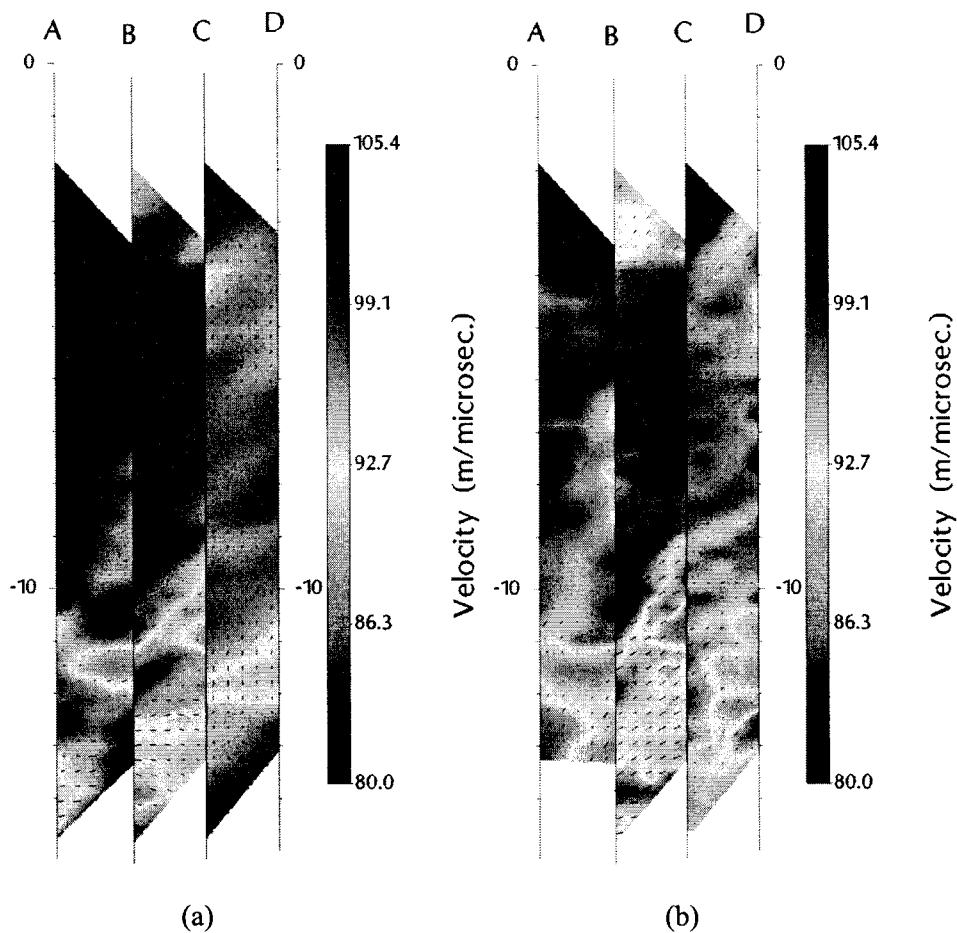


Fig. 8. Comprehensive tomograms of maximum velocity between the boreholes A and D. (a) before excavation (b) after excavation. The oblique short line in a tomogram points in the direction of maximum velocity and its length represents the anisotropy ratio.

7. 사례 4 화강암내의 미세 열극과 이방성

경상남도 거창군 웅양면에 위치하는 화강암 석산에서 시추공 레이더 반사법 탐사, 레이더 토모그래피, GPR, 지표 전기비저항 탐사 등으로 구성된 종합적 물리탐사를 실시하였다. 이에 부가하여 반사체의 3차원적인 발달 방위를 확인하기 위하여 방향탐지 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사(Kim *et al.*, 1998) 또한 수행하였다. 탐사의 목적은 암반 내부에 발달하는 열극, 파쇄대의 3차원적 발달 상황을 규명하고 암석의 선선도 분포를 영상화함에 있었다. 시추공 레이더 탐사에 사용한 기기는 Mala Geoscience사의 RAMAC/Borehole 시스템이었으며 토모그래피 탐사에 사용한 안테나의 중심 주파수는 20 MHz이었다.

시추공 레이더 토모그래피 탐사는 6개의 시추공을 이용하여 총 7개 단면에 걸쳐 수행하였다. 이들 중 3개의 단면에 대한 자료에서 전자기파의 속도가 전파 방향에 의존하는 이방성이 관찰되었다. 위에서 논의한 바와 같이 국내의 석회암 또는 편마암의 경우에는 특정 광물이 일정한 면을 따라 배열함에 따른 이방성이 나타나는 경우가 종종 있었으나 결정질 암석인 화강암은 매우 드문 경우이다. 이방성의 원인을 밝히기 위하여 6개 시추공에 대한 Televiewer 자료와 토모그래피 탐사 자료를 비교하였으며, 그 결과 이 지역에서의 이방성은 동일한 방향으로 배열되어 있는 미세 열극과 밀접한 관련이 있다는 결론을 얻었다.

Fig. 9의 최고속도 토모그래피 영상의 양단에 부가한 Televiewer 자료 해석 결과에 나타나 있는 바와 같이 시추공 BH-1에는 거의 전 시추 심도에 걸쳐 미세 열극이 동일한 방향으로 배열되어 있다. 이에 반해 BH-3에는 열극의 발달 빈도가 BH-1에 비해 현저하게 낮으며 그 배열 방향도 상대적으로 무작위적이라 할 수 있다. Fig. 9의 Televiewer 로그와 토모그래피 영상을 비교해 보면 열극의 발달 빈도가 높은 부분에서 이방성 계수가 높아짐을 알 수 있다. 또한 이러한 경향이 가장 뚜렷하게 나타나는 BH-1의 부근을 보면, 이방성 계수가 높은 부분에서 전자기파의 속도가 낮아지며 암석의 선선도도 낮아지는 것으로 나타난다. 이러한 역상관 관계는 앞에서 논한 세 가지 사례에서 이방성 계수가 높은 부분이 전자기파의 속도도 높게 나타나며 암석도 선선하다는 것과 정반대이다. 이는 이방성을 야기하는 원인이 앞의 세 사례는 특정 광물의 배열에 있음에 반해 이 사례는 석재의 품질을 저하시키는 열극의 배열에 있기 때문이다.

Fig. 9에서 또 다른 흥미있는 특징을 관찰할 수 있는데 열극의 배열 방향과 대칭축의 배열 방향, 즉 최고속도를 갖는 방향과 거의 일치한다는 점이다. 즉 열극의 배열 방향과 나란하게 전자기파가 전파될 때에 가장 속도가 빠르며, 그에 수직일 때에 가장 느리다는 점을 의미한다. 이러한 사실은 열극의 배열 방향과 수직으로 전파할 때에 지하수에 포화되어 매우 낮은 속도를 갖는 열극을 가장 많이 통과할 수 있다는 점으로 쉽게 이해할 수 있다.

시추공 레이더 반사 영상, 토모그래피 영상, GPR 영상 등을 종합하여 조사 석산에 발달하는 파쇄대의 3차원적 분포와 양질의 석재 자원의 분포 양상을 도출해 낼 수 있었다. 위에서 언급한 바와 같이 6개의 토모그래피 단면 중 3단면에서 이방성이 나타났으며 이방성과 열극의 발달과는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 이러한 사실을 이용하여 이방성 토모그래피 영상에서 나타나는 이방성 계수의 분포 양상을 암질의 해석에 활용함으로써 좀 더 정확하게 양질의 석재자원 분포 범위를 도출할 수 있었다.

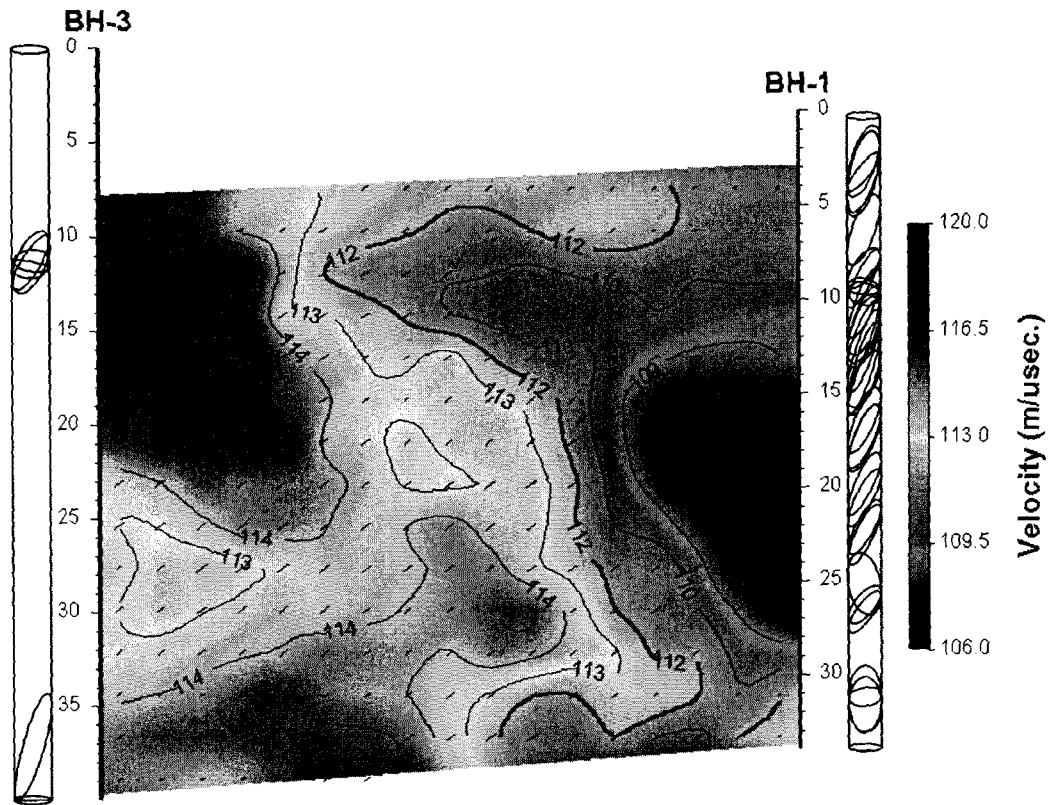


Fig. 9. Tomogram of maximum velocity acquired at a granite quarry mine. Attached to the borehole axes are the televiewer 3-D logs, interpretation results of the televiewer images. The oblique short line in a tomogram points in the direction of maximum velocity and its length represents the anisotropy ratio.

8. 결론

지금까지 이 연구에서 개발한 이방성 토모그래피 역산 알고리즘과 4가지의 이방성 레이더 토모그래피 현장탐사 사례에 대해 논의하였다. 각종의 사례를 통해, 개발한 알고리즘의 효율성을 확립함과 아울러 지하 매질의 이방성 분포는 지하 암반의 상태와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 논의한 탐사 사례 중, 사례 1, 2, 3은 이방성이 약하게 나타나는 부분이 파쇄대, 변질대, 풍화대, 혹은 공동 등과 같은 연약 암반이 분포할 가능성이 높으며, 이에 반해 사례 4는 이방성이 높을 경우 암질이 떨어지는 암석이 분포할 가능성이 높다. 이는 이방성을 야기하는 원인이 사례 1, 2, 3은 특정 광물의 배열에 있음에 반해, 사례 4는 석재의 품질을 저하시키는 열극의 배열에 있기 때문이다.

지금까지 논의한 이방성 토모그래피 사례를 통하여, 지하 매질이 이방성을 띠는 경우, 이방성의 분포는 지하의 상태 변화를 이해하는 데에 매우 중요한 역할을 하며, 이방성 분포 자체가 매우 중요한 정보라는 결론을 얻을 수 있었다. 특히 최고속도와 최저속도의 차이를 최고속도로 정규화한 값으로 정의한 이방성 계수는 이방성 토모그래피 영상을 해석함에 매우 유용함을 확인하였다.

참고문헌

- 김정호, 정승환, 조인기, 1996, 암반내 레이더 탐사를 위한 암석의 유전율 측정, 한국자원공학회지, **33**, 383-390.
- 김정호, 조성준, 이명종, 송윤호, 정승환, 1999, 시추공 레이더 탐사법을 이용한 석회암지대 공동조사, 한국지반공학회 암반역학위원회 세미나논문집 - 석회암공동 및 폐갱도 탐사와 보강대책 -, 93-118.
- Cho, S.-J., and Kim, J.-H., 1997, Radar traveltime tomography in anisotropy media - in the application of limestone area, *EAGE 59th Conference and Technical Exhibition*.
- Falke, L., Magnusson, K. A., Olsson, O., Ammann, M., Keusen, H. R., and Sattel, G., 1988, Analysis of radar measurements performed at Grimsel rock laboratory in October 1985, Grimsel test site : Technical Report 87-13, NAGRA, Baden, Switzerland.
- Jeffreys, D., 2004, *Ground Penetrating Radar, 2nd Ed.*, IEE Radar Sonar and Navigation Series 15, The Institution of Electrical Engineers.
- Jung, Y., and Kim, J.-H., 1999, Application of anisotropic georadar tomography to monitor rock physical property changes, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **4**, 87-92.
- 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 -Fracture Imaging-*, 291-296.
- Kim, J.-H., Cho, S.-J., Yi, M.-J., 2004, Borehole radar survey to explore limestone cavities for the construction of a highway bridge, *Mulli-Tamsa*, **7**, *Exploration Geophysics*, **35**, *Butsuri-Tansa*, **57**, 80-87.
- Lesmes, D. L., Decker, S., M., and R., D. C., 1997, A multiscale radar-stratigraphic analysis of fluvial aquifer heterogeneity, *Geophysics*, **67**, 1452-1464.
- Peterson, J. E. Jr., 2001, Pre-inversion corrections and analysis of radar tomographic data, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **6**, 118 p.
- Sénéchal, P., Hollender, F., and Bellefleur, G., 2000, GPR velocity and attenuation tomography corrected for artifacts due to media anisotropy, borehole trajectory error and instrumental drifts, *Proceedings of the 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia*, 402-407.
- Seol, S. J., Kim, J.-H., Cho, S.-J., and Chung, S.-H., 2002, Case history: A radar survey at a granite quarry mine to delineate fractures and to estimate the freshness of rock, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002), Las Vegas*, 12GPR9.
- Tillard, S., 1994, Radar experiments in isotropic and anisotropic geological formations (granite and schists), *Geophysical Prospecting*, **42**, 615-636.
- Vasco, D. W., Peterson, J. E., Jr., and Lee, K. H., 1997, Ground-penetrating radar velocity tomography in heterogeneous and anisotropic media, *Geophysics*, **62**, 1758-1773.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H., and Chung, S.-H., 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.