

시추공 레이더 탐사법을 이용한 석회암지대 공동조사

Application of borehole radar survey to detect cavities in limestone area

김정호¹⁾, Jung-Ho Kim, 조성준²⁾, Seong-Jun Cho, 이명종²⁾, Myeong-Jong Yi,
송윤호³⁾, Yoon-Ho Song, 정 승환¹⁾, Seung-Hwan Chung

¹⁾한국자원연구소 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geology, Mining & Materials

²⁾한국자원연구소 연구원, Researcher, Korea Institute of Geology, Mining & Materials

³⁾한국자원연구소 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Geology, Mining & Materials

서 론

지하공간의 활용, 고속철도 및 교량, 대형 구조물의 건설 등에 있어서 폐갱도 또는 석회암 공동 등은 구조물의 안정성 확보에 중요한 인자의 하나이며, 따라서 이들에 대한 효율적인 탐지 방법의 수요가 급증하고 있다. 석회암 지대 내부에 발달하는 공동 탐지를 위한 지표 물리탐사법으로는 전기비저항, 지표 탄성파, GPR 탐사 등이 활용될 수 있다.

국내에서는 지질적 조건 등에 의하여 지표 탐사로는 전기비저항 및 GPR 탐사가 널리 활용되고 있다. 그러나 지표 전기비저항 탐사는 탐사 원리상 분해능의 한계 때문에 고립된 공동을 직접적으로 탐지하기는 매우 어렵다. 지표 전기비저항 탐사에 의한 공동 탐지는 석회암 내부에 발달하는 공동은 파쇄대 등의 지하수 유동 경로를 따라 배태되는 경우가 많으므로 파쇄대를 탐지함으로써, 기존의 정보와 종합해석하여 공동의 분포를 파악하는 접근 방법을 취한다. GPR의 경우에는 전기비저항 탐사보다 분해능이 높아 공동에 대한 영상을 직접적으로 획득할 수 있지만, 표토층이 전기전도도가 높으므로, 극히 천부에 위치하는 경우를 제외하고 기반암 내부에 위치하는 공동을 탐지하기는 매우 어렵다.

시추공을 이용하여 공동 또는 터널을 탐지할 수 있는 방법으로는 탄성파 토모그래피, 전기비저항 토모그래피, 그리고 본 논문에서 다루고자하는 시추공 레이더 탐사를 들 수 있다. 그러나 탄성파 토모그래피 및 전기비저항 토모그래피는 공동에서 직접 반사된 파를 이용하는 것이 아니라 시추공 사이를 투과한 에너지를 이용하여 지하를 영상화하므로 기대한 만큼의 고분해능 영상을 획득하기 어려운 경우가 많게 된다.

시추공 레이더 탐사는 시추공 레이더 반사법 탐사, 레이더 토모그래피, 방향탐지 안테나를 이용한 반사법 탐사로 분류한다. 레이더 탐사는 수십 MHz의 고주파 전자파 펄스를 이용하므로 전기전도도가 높은 지역에 대해서는 적용하기 어렵다. 그러나 비교적 신선한 암반은 전기비저항이 높은 경우가 대부분이므로 시추공 레이더 탐사는 암반 내부에 발달하는 지하 공동에 대한 고분해능 지하 영상을 제공할 수 있다. 시추공 레이더 탐사는 토모그래피 뿐만 아니라 GPR을 시추공에 적용한 것과 같은 반사법 탐사가 가능하므로, 두 종류의 탐사의 장점을 모두 취할 수 있다. 또한 방향탐지 안테나를 이용한 탐사를 병행한다면 지하 공동의 3 차원적인 부존 상황에 대한 정보 내지는 영상의 획득이 가능해진다.

본 논문에서는 시추공을 이용한 3 종류의 레이더 탐사법에 대하여 그 원리를 설명하였으며, 국내의 석회암 지역 탐사에 있어서 자주 발견되는 이방성 토모그래피 문제를 논의하였다. 석회암 지역 공동 탐사의 공동 탐사 사례들을 통하여, 시추공 레이더 반사법 탐사 및 토모그래피 탐사를 이용한 석회암 공동의 영상화, 연약대의 분포 파악 등의 석회암 지역 토목 지반조사에 기본적인 사항들에 대하여 검토하였다. 끝으로 파쇄대 탐지 사례를 통하여, 방향탐지 안테나를 이용한 레이더 반사법 탐사 자료로부터 공동의 3 차원적 부존 정보 파악 가능성을 타진하였다.

시추공 레이더 탐사

레이더 탐사는 현재 상업적으로 이용되는 물리탐사 기술 중 그 해상도가 가장 뛰어난 물리 탐사기술 중의 하나이며 국내에서도 최근에 매설물 탐지나 지반조사 분야에서 지하 정밀 영상화를 위해 거의 빠짐없이 사용되고 있다. 레이더 탐사는 고주파수(수십 MHz - 수 GHz)의 전자기파를 이용하므로 큰 의미의 전자탐사에 속하나, 전자탐사가 일반적으로 지하매질의 전자기유도 현상에 근거하는데 반해, 레이더 탐사는 원리상 탄성과 탐사와 마찬가지로 파동의 전파, 반사 및 굴절 성질 등을 이용하므로 전자탐사와 구분하여 다루고 있다. 레이더 탐사는 송·수신 안테나가 지표에 위치하느냐 또는 시추공 내에 위치하느냐에 따라 지표 레이더(GPR) 탐사와 시추공 레이더 탐사로 나뉘어 진다. 본 논문의 주제가 되는 시추공을 이용한 레이더 탐사는 시추공 레이더 반사법 탐사와 토모그래피 탐사로 나뉘어 질 수 있다.

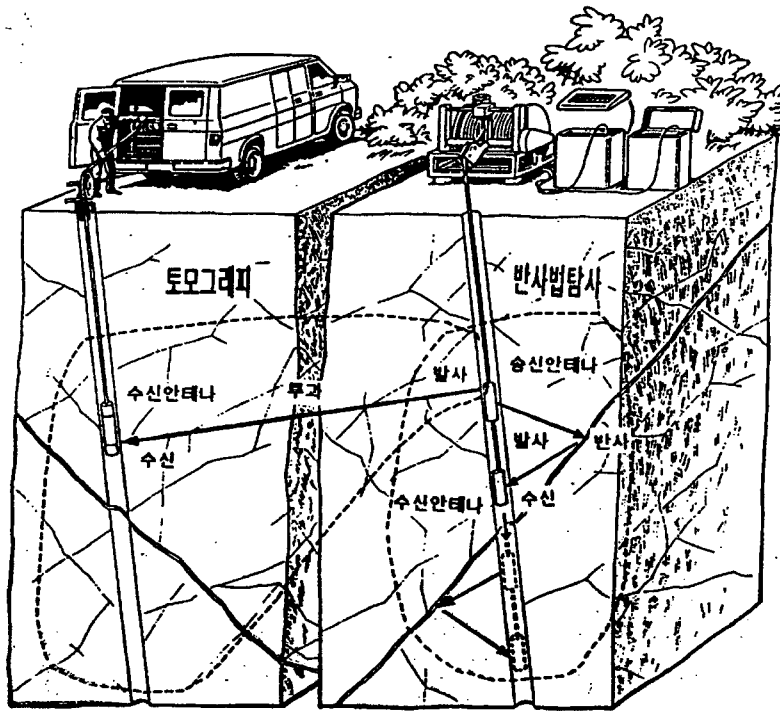


그림 1. 시추공을 이용한 시추공 레이더 탐사 및 레이더 토모그래피의 모식도

시추공을 이용한 레이더탐사는 시추공 반사법 탐사와 시추공간 토모그래피 탐사로 구분된다. 그림 1에 이들 두 방법의 원리를 모식적으로 나타내었다. 토모그래피 탐사는 두 개의 시추공에 송·수신 안테나를 따로 삽입하여 지하의 불균질대를 통과하여 수신된 레이더 파를 이용하여 지하구조를 영상화하는 방법인데 반해, 시추공 반사법 탐사는 하나의 시추공에 송·수신 안테나를 삽입하여 지하의 불균질대 및 공동 등에서 반사된 레이더 파를 이용하여 지하구조를 영상화하는 방법으로 GPR 탐사를 시추공에서 수행하는 것과 비슷한 의미를 갖는다. 두 종류의 시추공 레이더 탐사에서 레이더 반사법 탐사는 암반의 균열대 또는 암맥, 그리고 지하 공동의 영상을 뚜렷하게 나타내 줄 수 있다는 큰 장점을 갖는다. 이에 반해 토모그래피 탐사는 두 시추공 사이의 암반의 신선도에 대한 영상을 잘 그려내 줄 수 있다는 장점을 갖고 있으며, 지하의 연약대 분포를 훌륭하게 영상화 할 수 있다. 이와 같은 이유 때문에 시추공에서의 두 탐사 방법은 상호 보완적인 의미를 갖는다.

레이더 토모그래피 및 시추공 레이더 반사법 탐사를 위한 현대적인 의미의 하드웨어 및 탐사 기법은 핵 폐기물 처분장 조사를 위하여 개발된 것이며(Thierbach, 1991), 이러한 사실은 신선한 암반의 소규모 균열대 또는 공동의 탐지에 탁월함을 간접적으로 대변하여 주고 있다. 한편 토모그래피 기법이 지하의

물성 분포를 영상화 한 것이라면, 이에 반해 시추공 레이더 반사법 탐사는 암석이 가지는 전기적 물성 (전기비저항, 유전율)의 경계를 영상화 한 것이므로 두 방법을 병용하여 탐사를 수행함이 바람직하다.

시추공 레이더 탐사에 이용되는 물성은 전파 매질의 전기적 물성인 유전율과 전기비저항이며 특히 유전율은 레이더 파의 전파속도를 주로 좌우하므로 중요한 의미를 갖는다. 표 1은 10-20 MHz 대역에서 국내 암석의 상대 유전율을 측정된 결과를 나타낸 것이다(김정호 등, 1996). 화강암, 편마암은 6에서 7 정도의 값을 보여 주며, 화강암이 편마암보다 약간 낮은 유전율을 갖는다. 가장 유전율이 높은 것은 셰일이며 매우 강한 이방성을 나타내고 있다.

표 1. 10 - 20 MHz 주파수 대역에서의 국내 암석의 상대 유전율.

암석	상대 유전율
불국사 화강암	6.5 - 6.7
대보 화강암	6.1 - 6.4
편마암 (⊥)	6.8 - 6.9
편마암 (//)	6.3 - 6.4
규암	5.1 - 5.2
석회암	8.3 - 8.8
셰일 (⊥)	25.0 - 28.0
셰일 (//)	19.0 - 22.0
황산 응회암 (⊥?)	8.8 - 8.9
황산 응회암 (//?)	8.4 - 8.5

(⊥) : Measured along the bedding plane

(//) : Measured perpendicular to the bedding plane

표 2. 20, 50 MHz 대역에서의 국내 암석의 레이더 파 전파 속도.

암석	속도 (m/μsec.)	
	20 MHz	50 MHz
불국사 화강암	118	ditto
대보 화강암	120	"
편마암 (⊥)	115	"
편마암 (//)	120	"
규암	132	"
석회암	102	"
셰일 (⊥)	58	68
셰일 (//)	66	75
황산 응회암	102	119

(⊥) : Measured along the bedding plane

(//) : Measured perpendicular to the bedding plane

모든 전기적 물성은 가해지는 전자장의 주파수에 의존한다. 표 2는 20 MHz 및 50 MHz의 두 중심 주파수에서의 레이더 파 속도를 나타낸 것이다. 주파수에 대한 강한 의존도를 보이는 것은 셰일과 응회암으로 주파수가 높아짐에 따라 속도가 증가함을 보여주고 있다. 이는 주파수가 증가함에 따른 유전율의 감소라는 일반적인 경향에 의한 것이다. 국내 지질의 대부분을 구성하는 화강암, 편마암 등의 결정질 암석은 측정된 주파수 대역에서는 속도의 변화를 거의 보이지 않고 있다.

시추공 레이더 반사법 탐사의 원리

GPR 탐사는 지표에 송·수신 안테나가 위치하기 때문에 암반을 덮고 있는 표토층의 상대적으로 높은 전기전도도에 의한 레이더 파의 감쇠로 인해 레이더 파가 암반 내부까지 도달하지 못함이 대부분이므로, 암반내에 발달하고 있는 파쇄대를 비롯한 각종 결함, 불균질대 등을 효과적으로 영상화할 수 없다. 시추공 레이더 반사법 탐사는 이러한 암반내의 불균질대를 영상화하기 위하여 전기전도도가 낮은 지하 암반 내에 송·수신 안테나를 위치시키는 레이더 탐사법으로서, 지하의 불균질대에서 반사된 레이더 파를 이용하여 지하를 영상화시킨다는 점에서 GPR과 동일한 원리에서 출발한다. 그러나 안테나가 시추공 내에 위치함으로 인하여 GPR과는 다른 특징을 가지므로 시추공 레이더 반사 영상은 더 이상 지하 단면도가 될 수가 없으며, GPR에서의 심도 축은 시추공으로부터의 거리 축으로 표현된다.

그림 2 (a)는 시추공 레이더 반사법 탐사의 측정 방법을 모식적으로 나타낸 것이다. 그림 2 (b)는 시추공 레이더 반사법 탐사에서 얻어지는 신호의 특성을 보여준다. 그림의 (b)에서 볼 수 있듯이, 점 반사원이 존재할 경우에는 반사 영상에 점의 형태로 나타나는 것이 아니라 점 반사원이 있는 위치를 중심으로 회절 양상(diffraction pattern)을 보여 준다. 대부분의 지하 공동 또는 터널 등은 점 반사원이 되기 때문에 회절 양상은 지하 공동의 탐지에 대단히 좋은 지시자 역할을 하게 된다.

그림 3은 실제 지하 터널의 반응에 대한 현장 실험의 예로써 터널의 내부는 모래와 버력으로 채워진 상태이다. 모래 등으로 공동이 충전되어 있는 경우는 비어 있거나, 혹은 물이나 점토가 충전되어 있는 경우보다는 주변 모암과의 물성차이가 그다지 크지 않으므로 반사 에너지가 상대적으로 작아진다. 그러나 그림의 (a)에는 위에서 서술한 바와 같은 터널에 의한 회절 양상이 잘 나타나 있다. 그림의 (b)는 탄성과 및 레이더 자료처리 기법 중 구조보정(migration) 기법을 적용한 영상으로 회절반응은 사라지고 터널의 영상을 뚜렷하게 보여주고 있다.

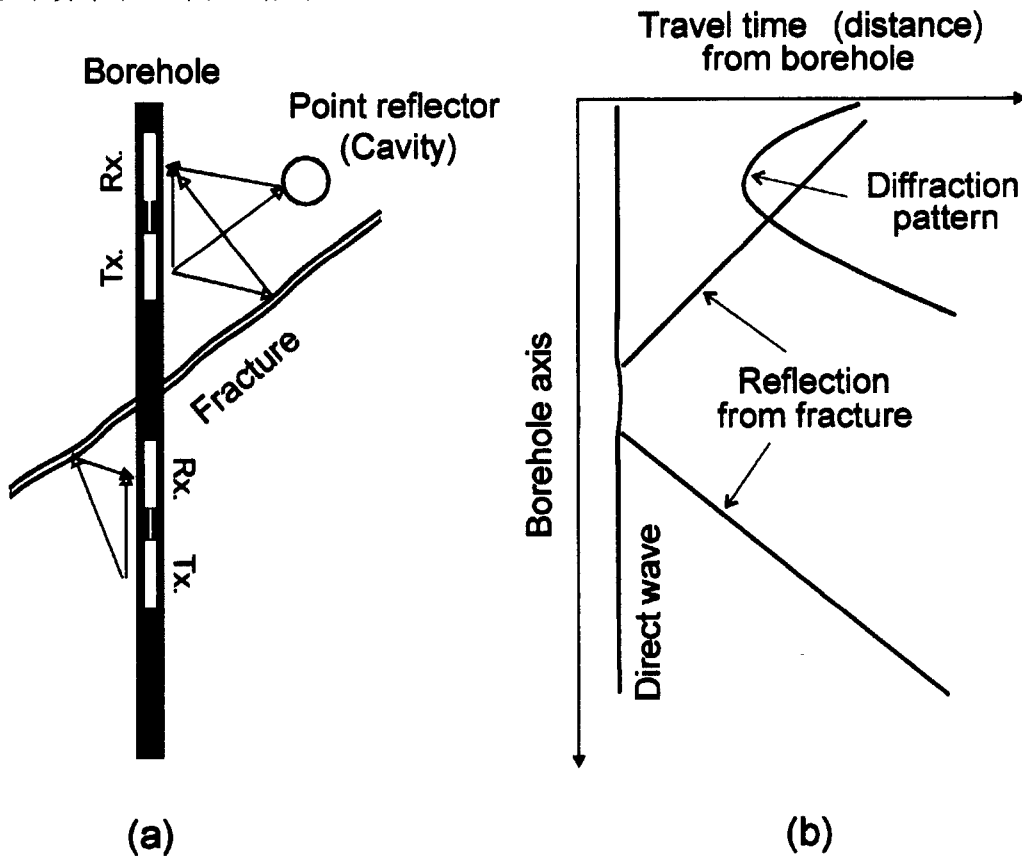


그림 2 (a) 시추공 레이더 반사법 탐사의 원리. (b) 점 반사원 및 면 반사원의 반사 영상 모식도.

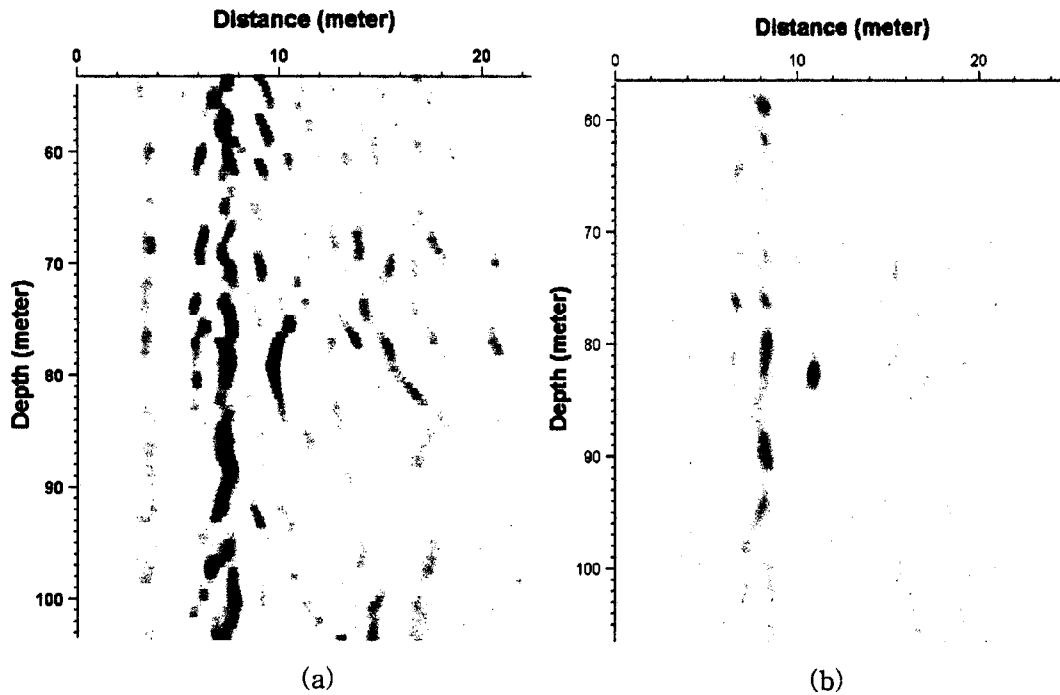


그림 3. 지하 터널의 시추공 레이더 반사 영상. (a) 구조보정 처리전. (b) 구조보정 처리후.

한편 파쇄대 또는 암맥은 지하 공동, 터널 등과는 달리 일종의 면 반사원 (plane reflector)으로서 작용한다. 이 경우 레이더 영상에는 점 반사원과는 달리 선형으로 나타나게 되는데, 그림 2 (b)는 파쇄대가 시추공을 관통할 때 나타나는 반사 영상을 모식적으로 보여주고 있으며, 시추공 레이더 반사법 탐사와 지표 레이더 반사법 탐사, 즉 GPR 탐사와의 차이점을 잘 말해 주고 있다. GPR 탐사의 레이더 영상은 안테나가 자유면 상에 위치하므로, 전자파가 거의 수직으로 수신기에 입사되어 실제의 지질 단면도와 유사한 형태를 보여 줄 수 있다. 그러나 시추공 탐사는 안테나가 지하에 위치하므로 시추공 축을 중심으로 하여 360 도 전 방향으로 전자파가 방사되고 수신된다. 그러므로 단일 시추공 탐사의 반사파 단면도는 단지 시추공과 반사면과의 거리만이 표시될 뿐이며 반사면이 어느 방향에 존재하는 것인가는 나타나지 않는다. 그림에서 시추공을 절단하는 평면 반사면이 단면도에서는 시추공으로부터 두 개의 서로 다른 반사면처럼 나타나는 것은 이와 같은 시추공 반사법 탐사 단면도의 특성 때문이다.

방향탐지 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사

그림 4는 앞에서 설명한 시추공 레이더 반사법 탐사 반사 영상의 특성을 잘 설명하고 있다. 영상에서 확인된 불균질대는 시추공을 중심축으로 하고 시추공으로부터의 거리를 반지름으로 한 원호 상의 임의의 한 점에 존재할 수 있다. 따라서 시추공 레이더 반사법 탐사 영상에서 확인된 불균질대에 대한 3 차원적인 정확한 부존정보를 얻기 위해서는, 불균질대가 그림 4의 원호상에서 어느 지점에 존재하는가, 즉 시추공을 중심으로 한 방위각에 대한 정보의 획득이 필요하다.

반사면의 방향의 감지는 방향탐지 안테나 (direction finding antenna)을 이용하여 달성된다. 방향탐지 안테나는 안테나의 종류 및 배열 상태에 따라 전자파 방사특성(radiation pattern)이 달라지는 원리를 이용한다. 그림 5 (a)는 쌍극자 안테나와 루프 안테나의 방사 패턴 모식도이다. 그림에서 좌표의 원점이 안테나 중심축이 된다. 원으로 표시한 것이 쌍극자 안테나 방사 패턴이며, 따라서 안테나 중심축에 수직인 단면상에서는 완전한 무지향성을 갖는다. 그림에서 점선으로 표시한 두 원이 루프 안테나의 방사 패턴으로, 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

따른 방향이다. 따라서 만약 루프 안테나 신호를 이용하여 최대, 혹은 최소 입사 방향을 결정할 수 있다면 입사 전자파의 방향을 알 수 있다. 독일연방지질자원연구소의 방향탐지 안테나는 두 개의 루프 안테나(loop antenna)와 1 개의 쌍극자 안테나 (dipole antenna)를 조합하여 사용한다(Mundry and et. al., 1983). 한국자원연구소 보유의 방향탐지 안테나는 4 개의 로드 안테나(rod antenna)로 구성되며, 자료처리 단계에서 로드 안테나 신호로부터 루프 안테나 신호를 합성하여 반사층의 방위각을 결정한다.

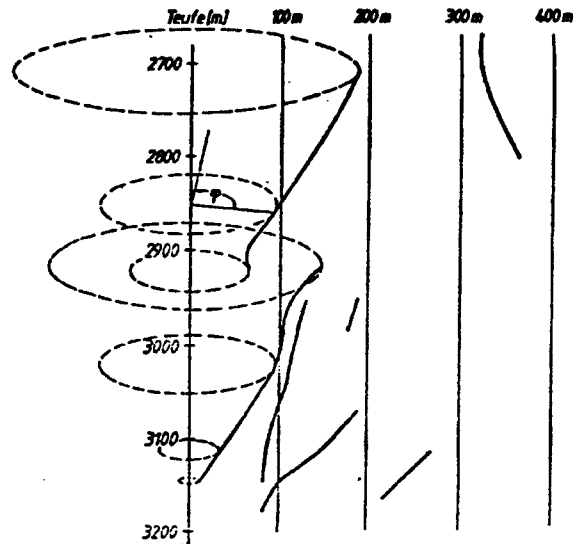


그림 4. 쌍극자 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사 이벤트의 3 차원 공간적 의미 (Mundry et. al., 1983).

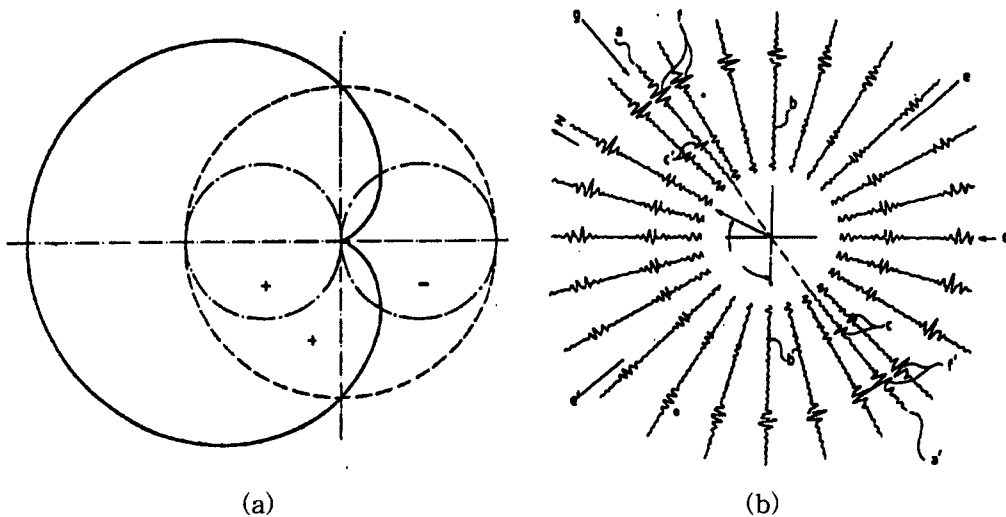


그림 5. (a) 루프 및 쌍극자 안테나의 방사 패턴. (b) 루프 안테나 입사 방향에 따른 레이더 반사 신호의 변화(Mundry et. al., 1983).

시추공 레이더 반사법 탐사자료는 GPR, 탄성파 반사법 탐사자료와 같이 레이더 파의 감쇠보정, 신호 대 잡음비를 향상시키기 위하여 적절한 전산처리가 필요하다. 방향탐지 안테나 탐사자료는 미세한 위상 차로써 반사층의 방위각을 추출하므로, 신호처리시 위상정보를 변경시킬 수 있는 자료처리 방법은 적용할 수 없다.

레이다 토모그래피

레이다 토모그래피는 고주파수 (수십 MHz)의 전자기파를 사용한다는 것을 제외하고는 탄성파 토모그래피와 거의 유사하다. 레이다 토모그래피 영상을 구하는 알고리즘에는 다양한 방법이 있으나, 탄성파 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).

레이다 탐사는 전자파가 대상이므로 탐사의 기본이 되는 중요한 물성은 전기비저항 및 유전율이 된다. 지하내에서 전자파 펄스의 전파속도는 주로 유전율에 의존하며, 전자파의 감쇠는 주로 전기비저항에 의존한다. 따라서 속도 토모그램은 유전율 분포를, 감쇠 토모그램은 전기비저항 분포를 영상화한 것으로 간주할 수 있다. 유전율의 변화는 신선한 기반암을 그 매질로 할 경우 물의 함량 및 공극율 (porosity)에 의존한다. 일반적으로 파쇄대, 풍화대 및 변질대 등은 거의 대부분 신선한 기반암에 비해서 수분의 함량이 상당히 높으며 점토광물이 수반되는 것이 보통이다. 표 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 레이다 전파속도가 현저히 감소된다. 암반의 전기전도도 또한 암석내의 수분과 점토광물의 함량에 비례한다. 따라서 레이다 파의 속도 및 감쇠 토모그램 모두 암반의 신선도 또는 연약도를 영상화한 것으로 간주할 수 있다. 본 논문의 주제가 되는 공동의 경우, 공동이 비어 있을 경우는 공기의 레이다 파 전파속도는 빛의 속도와 같으므로 도달주시 토모그래피 영상에서 고속도 이상대로 영상화되며, 물이나 점토로 충전되어 있을 경우에는 이들의 속도가 암반보다 느리므로 저속도 이상대로 영상화 된다.

한편 레이다 탐사는 매우 높은 고주파수의 전자기파를 송신원으로 사용하기 때문에 전기전도도가 높은 지반 즉, 해수 침투 지역 등에서는 그 에너지의 극심한 감쇠로 인하여 적용 불가능한 단점이 있으므로 탐사 설계시 조사대상지역의 지질을 검토하거나, 가능하면 기존의 물리탐사 특히 전기 및 전자탐사 자료를 참조함이 추천된다. 만약 전기전도도가 매우 높아 레이다 탐사 수행시 신호를 수신할 수 없다면 비록 그 해상도는 떨어지는 단점이 있으나 전기적인 물성의 영상을 제공하는 전기비저항 토모그래피로 대체하거나 탄성파 토모그래피를 채택하여 지하의 영상을 얻을 수 있다.

레이다 토모그래피는 주로 암반 내에서 수행되기 때문에 물성의 차이가 크지 않으므로 측정되는 도달주시 또는 진폭 등은 그 값들의 대비가 크지 않다. 그러므로 송·수신 시추공 간격이 클 경우에는 큰 문제가 없지만, 짧은 경우에는 시추공 편차가 토모그래피 영상의 왜곡을 초래할 가능성이 크므로 시추공 편차측정을 수행하여 이에 대한 보정을 하여야 한다. 특히 공학적인 목적으로 수행될 경우에는 시추공 간격이 넓지 않으므로, 될 수 있는 한 시추공 편차측정을 수행하여 이에 대한 보정을 수행함이 바람직하다.

이방성 레이다 토모그래피

국내에서 수행된 레이다 토모그래피 탐사에서 화강암이 아닌 지역에서 획득된 토모그래피 자료는 이방성을 나타내는 경우가 많다. 이방성을 갖는 토모그래피 자료의 해석은 통상적으로는 이방성을 보정하여 등방성 자료로 변환한 후, 이를 처리하는 방법을 채택한다. 그러나 이러한 접근 방법은 토모그래피 단면 전체에서 이방성이 균질하여야 한다는 기본가정이 필요하다. Cho and Kim(1997)은 타원형 이방성 (elliptic anisotropy)를 가정하고 이방성 역산 기법을 개발한 바가 있다(Jung, et. al., 1998).

그림 6의 (a)는 국내 석회암 지역 구조물 안정성 확보를 위한 공동탐사를 위해 수행되었던 토모그래피 탐사의 초기도달주시를 이용하여, 두 시추공 사이의 토모그래피 탐사자료의 겉보기 속도를 레이다 파의 전파 각도에 대하여 그린 그래프이다. 그림에서 전파 각도에 따른 속도의 의존성, 즉 이방성을 뚜

렷하게 보여주고 있다. 그림 (b)는 이방성 토모그래피의 기본 가정 및 원리를 설명하고 있다. 즉 단면을 격자형 셀로 분할하고, 각 격자 내부에는 이방성이 균질하다는 가정하에서, 각 셀의 이방성을 최고 속도, 최저 속도, 그리고 대칭축 방향의 3 변수로 정의한다. 측정된 도달주시로부터 토모그래피 단면을 형성하는 모든 셀의 3 변수를 역산하면, 3 종류의 토모그래피, 즉 최고속도, 최저속도, 대칭축 토모그래피를 얻을 수 있다.

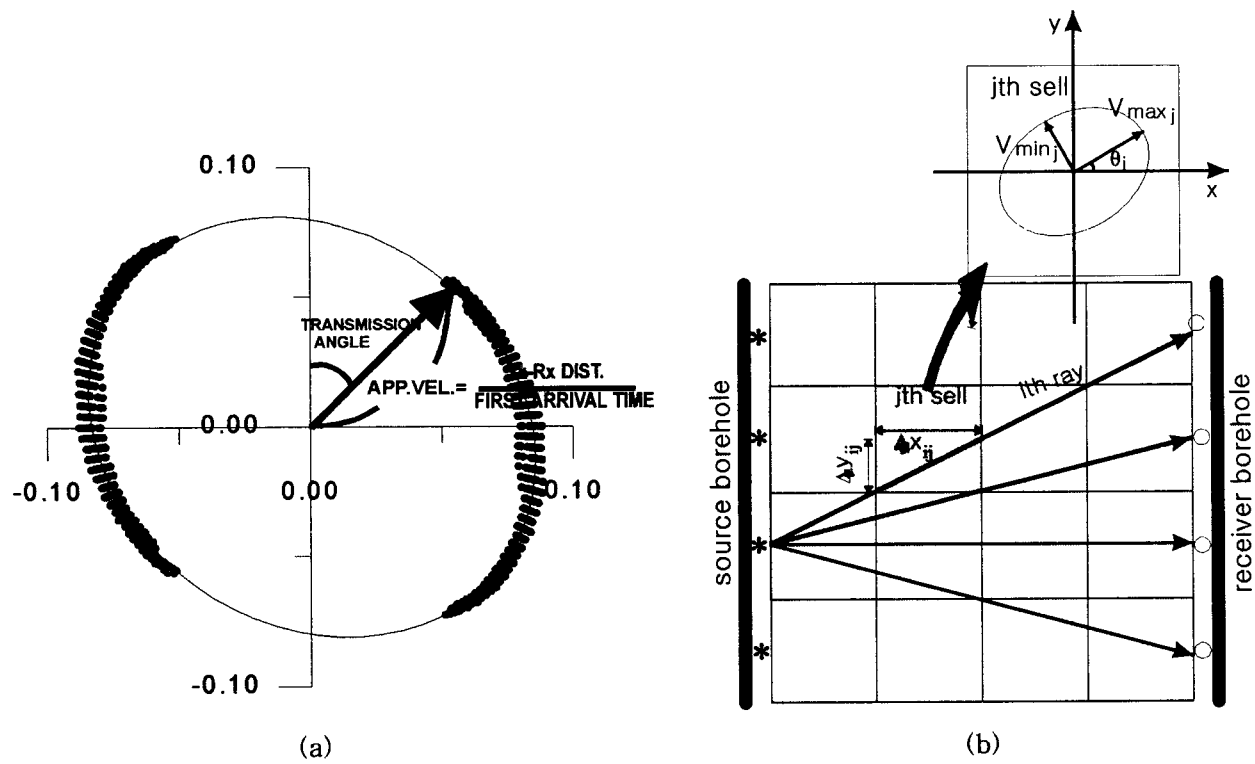


그림 6. (a) 타원형 이방성을 갖는 토모그래피 초기도달 주시. (b) 이방성 토모그래피의 셀분할.

그림 7은 이방성 토모그래피의 실험으로 (a)는 그림 6 (a)의 탐사자료에 등방성 토모그래피 알고리즘을 적용한 영상이며, (b)는 이방성 보정을 수행한 후 등방성 토모그래피를 적용한 것이며, (c)는 이방성 토모그래피를 적용한 결과이다. 그림 7은 다음에 논의할 공동탐사 사례 1에서 논의될 토모그래피 영상이다. 그림의 (a)에서는 두 단면이 시추공을 중심으로 하여 전혀 일치하지 않고 단지 이방성 효과에 의한 잘못된 속도 분포만을 보여주고 있다. 이방성 보정을 이용한 (b)의 경우에는 (a) 보다는 약간 나은 것으로 나타나 세부적인 부분에서는 불일치가 나타나고 있다. 이방성 토모그래피를 적용한 (c)에서는 공동 시추공을 중심으로 하여 두 단면이 매우 잘 일치할 뿐만 아니라 3 종류의 접근 방법 중에서 가장 높은 분해능을 보여주고 있다.

석회암지대 지하공동 탐지 사례 1

강원도에서 원광석 분쇄기 건설을 위한 지반조사의 일환으로 석회암 내부에 발달하는 공동의 분포 파악을 목적으로 GPR, 지표 전기비저항, 시추공 레이다 반사법 탐사 및 토모그래피가 수행되었다. 본 논문의 주제가 시추공 레이다 탐사이므로 시추공 레이다 탐사에 국한하여 그 결과를 서술한다. 그림 8은 조사가 진행되었던 3 개의 시추공의 위치를 나타내며, 시추공을 감싸는 사각형은 분쇄기가 위치할 지역을 표시한다. 시추공 레이다 반사법 탐사는 3 개의 시추공에 모두 실시하였으며, 레이다 토모그래피는 3 개의 시추공이 이루는 3개의 단면에 대하여 수행하였다.

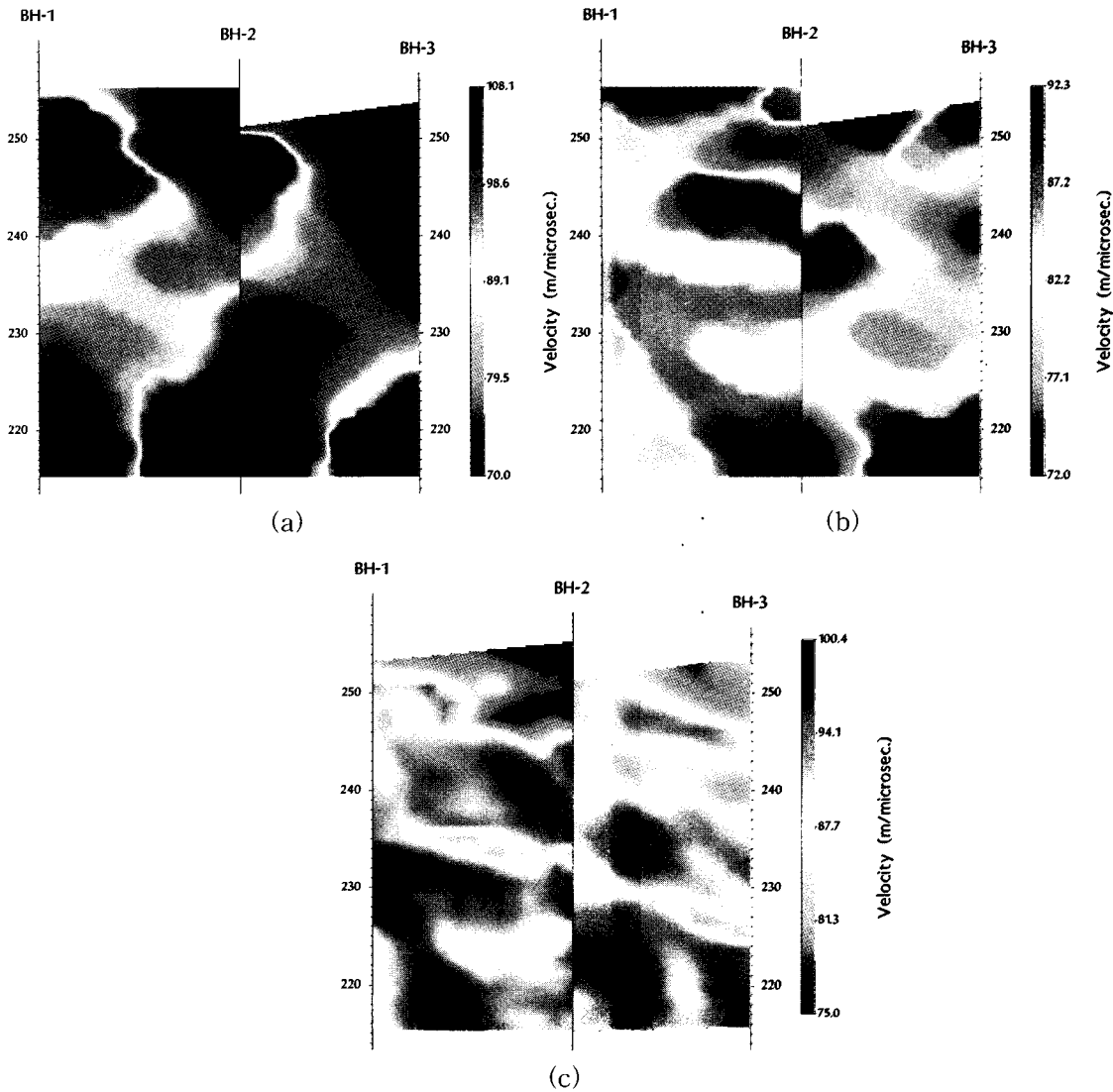


그림 7. 이방성 토모그래피의 실험. (a) 등방성 토모그래피 역산 영상. (b) 이방성 보정 이후 등방성 토모그래피 역산 영상. (c) 이방성 토모그래피 역산 영상.

그림 9는 3개의 시추공에 대한 레이더 반사법 탐사 영상으로 구조보정 처리를 하지 않은 영상이다. 그림에 나타낸 3개의 영상 모두 다양한 반사파가 보이나, 그림에 표시한 바와 같이 몇 조의 매우 강한 반사 이벤트들이 나타나고 있다. 이들은 대부분 고립된 반사체에 의한 것으로 보이며, 대부분 회절 양상을 수반하고 있다. 석회암 내부에 존재하면서 이와 같이 강한 반사파를 보일 수 있는 고립된 이상체는 지하 공동 외에는 다른 구조를 상정하기가 매우 힘들다. 그러나 영상에 나타나는 형태는 그림 3의 터널의 경우에 비하여 매우 불규칙적이며, 수직으로 연장되어 있는 모양이 대부분이다. GPR 영상의 탐사 영상은 이상적인 점반사원 형태를 나타내는 경우가 많으나, 시추공 레이더 반사법 영상은 측면에서 영상화하는 것이므로 수직적으로 불규칙한 형태로 연장되어 있는 경우가 많다.

영상에서 시추공 BH-1의 이상대 A는 1 개의 공동에 의한 반응이 아니며, 최소한 3 개 이상의 이상대의 반응이 합쳐져 나타나는 것으로 해석되며, 또한 이들 3 조의 이상대는 시추공을 중심으로 할 때 서로 다른 방향에 위치하는 것으로 보인다. 위에서 설명한 바와 같이 통상적인 쌍극자 안테나를 이용한 반사법 탐사에서는 시추공에 대한 방위를 알 수 없으므로, 수평적인 위치 추정이 불가능하다. 그러나 토모그래피 탐사에서는 단지 단면상에 위치하는 이상대에 대한 정보의 추출만이 가능함에 반해, 반사법 탐사에서는 수평면상에서의 위치 추정은 불가능하나, 시추공을 중심으로하는 가탐거리 반경 내의 공동

의 분포에 대한 개략적인 정보를 모두 얻을 수 있다는 점이 장점으로 지적될 수 있을 것이다.

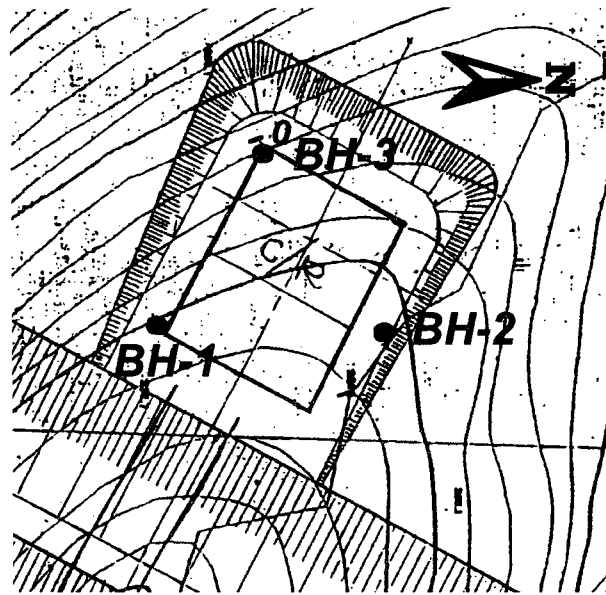


그림 8. 강원도 지역 석회암 공동조사를 위한 시추공 레이더 탐사의 시추공 위치도.

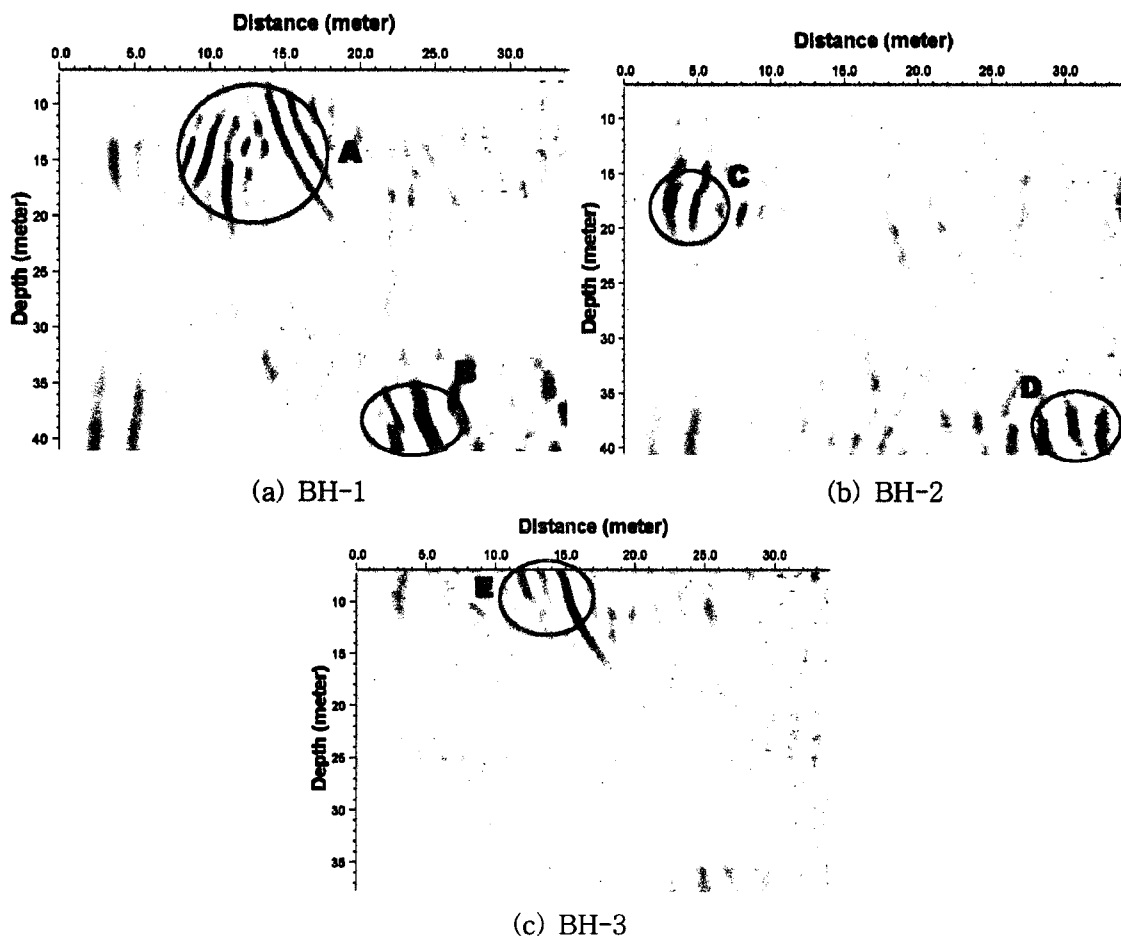


그림 9. 시추공 BH-1, BH-2 및 BH-3에 대한 시추공 레이더 반사 영상.

그림 10은 3 개의 시추공에 대해 수행된 3 단면의 토모그래피 영상을 연결하여 2 차원적으로 나타낸 것이다. 토모그래피 영상에 나타난 저속도 이상대는 모두 뚜렷한 경향을 보여주고 있으며, 이를 A, B, C, D, E, F로 나타내었다. 이들 이상대는 파쇄대에 대응되며, 지하수의 유동경로가 될 가능성이 크므로 그 내부에 공동이 형성되어 있을 가능성이 높다. 저속도 이상대 내부의 속도 분포를 보면 국부적으로 소규모의 이상대가 발달한다. 이들 이상대를 소문자로 표기하였으며, 이들은 공동의 영상으로 해석된다. 이들의 위치를 살펴보면 그림 2에서 논한 시추공 레이더 영상에 감지된 공동의 위치와 대응됨을 알 수 있다. 즉 BH-1의 이상대 A는 그림 3의 토모그램 이상대 a, c1 및 c2에, 그리고 BH-2의 이상대 C는 c1 또는 e에 대응되는 것으로 보인다. BH-1과 2에서 나타나는 이상대 B 및 D는 시추공으로부터의 거리로 보아 3개의 시추공이 형성하는 3 각형의 외부에 위치하는 것으로 해석되었다. 또한 이들은 토모그램 상에서 모두 국부적인 저속도 이상대로 나타나는 것으로 보아 점토 등으로 충전되어 있는 공동으로 해석되었다.

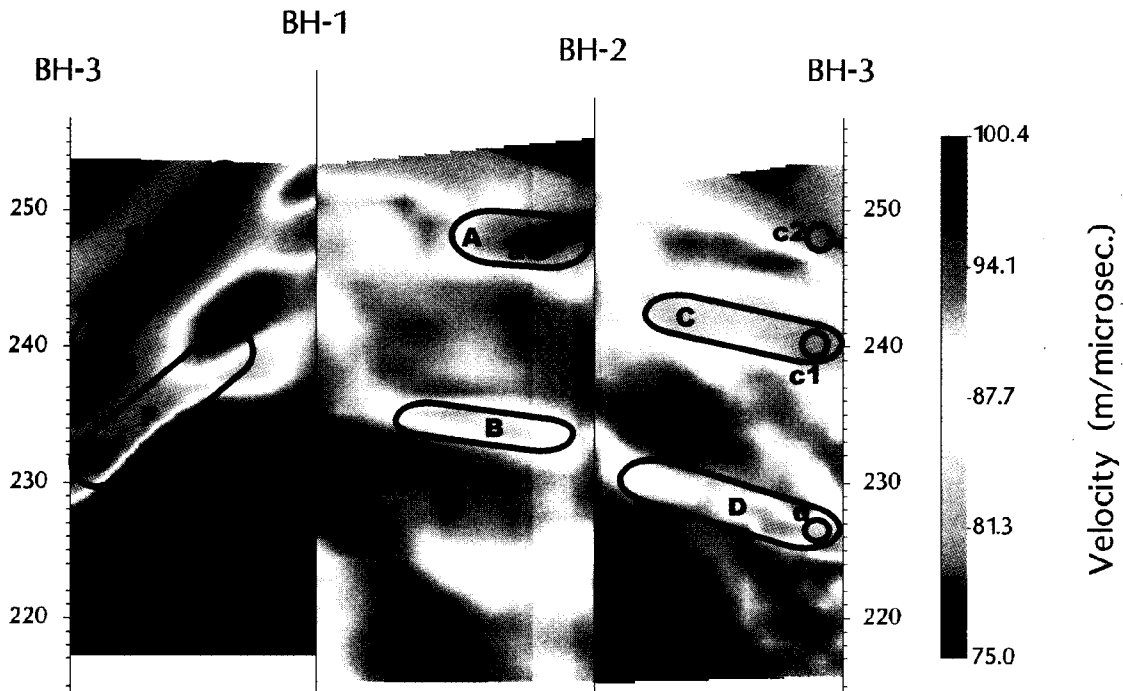


그림 10. BH-1, 2, 3(그림 1)이 형성하는 3 단면에 대해 획득한 레이더 토모그램을 연결한 영상.

이상에서 나타난 바와 같이 토모그래피는 두 시추공이 형성하는 단면상의 이상대에 대한 정보의 획득만이 가능할 뿐, 단면 외부에 대한 정보를 제공할 수 없다는 약점이 있다. 또한 쌍극자 안테나를 이용한 시추공 레이더 반사법 탐사는 시추공을 중심으로 하고 반경이 가탐거리인 원 내부에 위치하는 불균질대의 정보는 제공하나, 시추공을 중심으로 한 방위를 알 수 없다는 문제점이 있다. 물론 위에서 예시한 바와 같은 상호 영상의 비교 해석을 통하여 이를 보완할 수 있으나, 좀 더 정확한 공동의 위치를 파악하기 위해서는 방향 탐지 안테나를 이용한 탐사가 필요하다.

석회암지대 지하공동 탐지 사례 2

강원도에서 진동이 심한 구조물 건설을 위한 지반조사의 일환으로 석회암 내부에 발달하는 공동의 분포 파악을 위하여 GPR, 지표 전기비저항, 시추공 레이더 반사법 탐사 및 토모그래피 등의 종합적인 물리탐사가 수행되었다. 전술한 사례 1과는 달리 시추공 레이더 반사법 탐사 영상에 대한 결과 및 그 해석에 대하여 논한다. 그림 11은 조사가 진행되었던 14 개의 시추공들의 위치를 나타낸다.

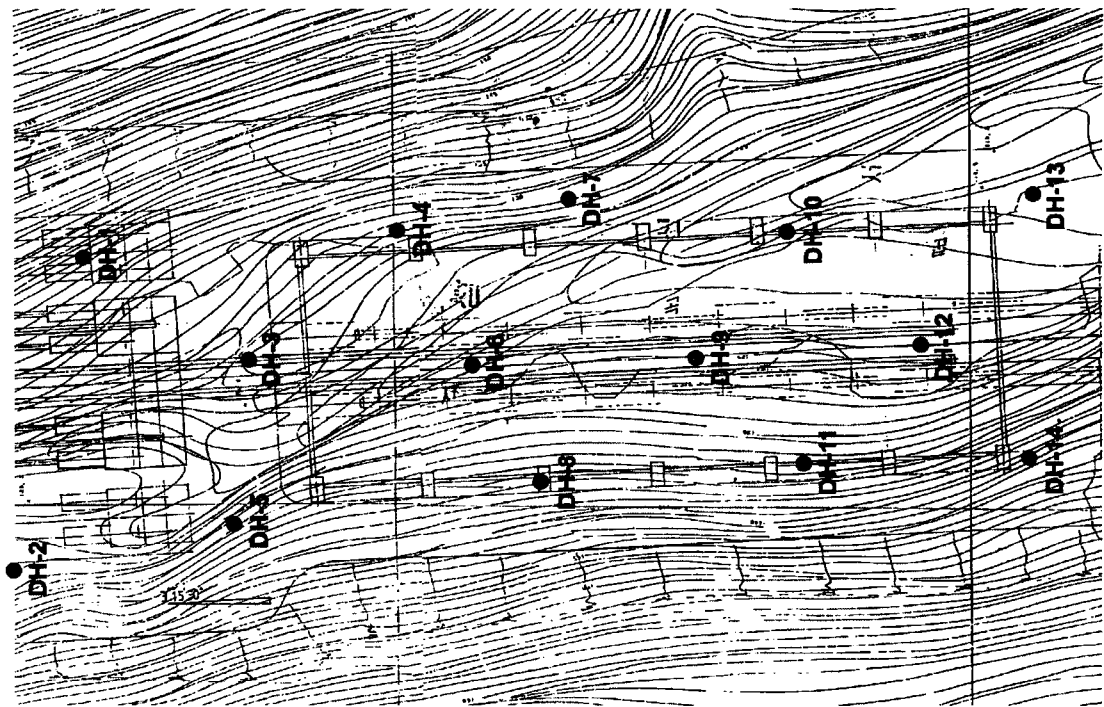


그림 11. 강원도 지역 석회암 공동조사를 위한 시추공 레이더 탐사의 시추공 위치도.

사례 1에서 논한 바와 같이 석회암 지대에서 공동은 비록 불규칙한 형태로 나타나나 파쇄대나 단층 등보다는 높은 반사 에너지를 보일 가능성이 높다. 그림 12는 그의 예로써 시추공 DH-1에서 획득된 시추공 레이더 반사법 탐사 영상이다. 그림 12 (a) 영상에서 공동과 파쇄대에 대응되는 반사파를 비교하면 공동은 국부적으로 출현하고 파쇄대는 연속성을 나타냄을 알 수 있다. 또한 그림 2에서 예시된 바와 같이 공동은 파쇄대에 비하여 반사파의 에너지가 강하며, 이는 모암과 공동의 물성의 대비가 파쇄대의 경우보다는 훨씬 크기 때문이다. 구조보정 이후의 영상에는 회절파로 흩어졌던 에너지가 반사체 위치로 모이기 때문에 반사파의 에너지 수준이 훨씬 더 높아진다. 그림 12 (b)는 이러한 점을 잘 예시하고 있으며, 공동의 수직 연장이 약 3~4 m 정도임을 보여주고 있다. 본 절에서는 이와 같이 시추공 레이더 반사법 탐사 영상에서 나타나는 반사파의 특성으로써 공동의 분포를 파악하는 사례를 제시하고자 한다.

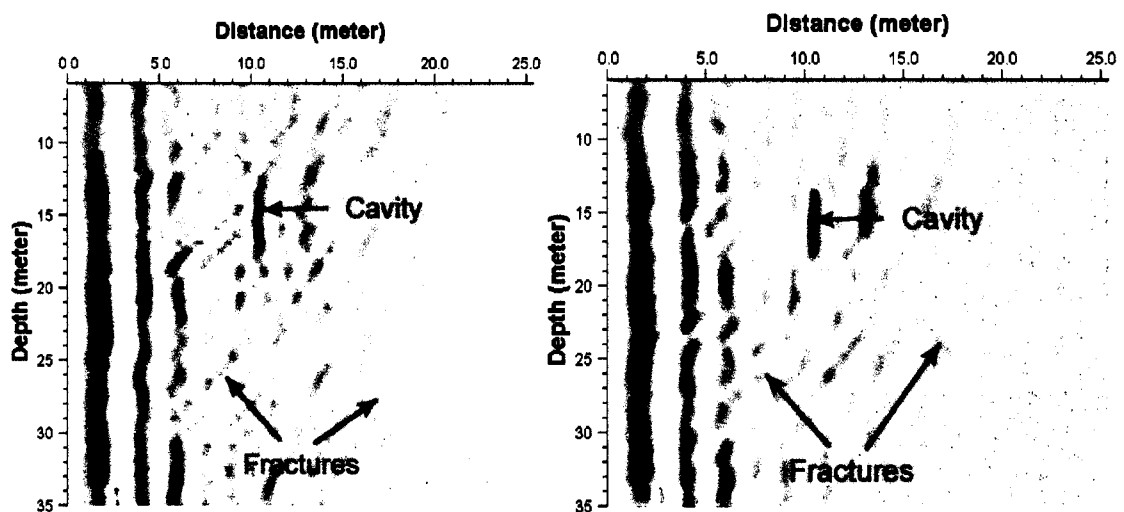


그림 12. 시추공 DH-1에서 획득된 레이더 반사 영상. (a) 구조보정 이전, (b) 구조보정 이후.

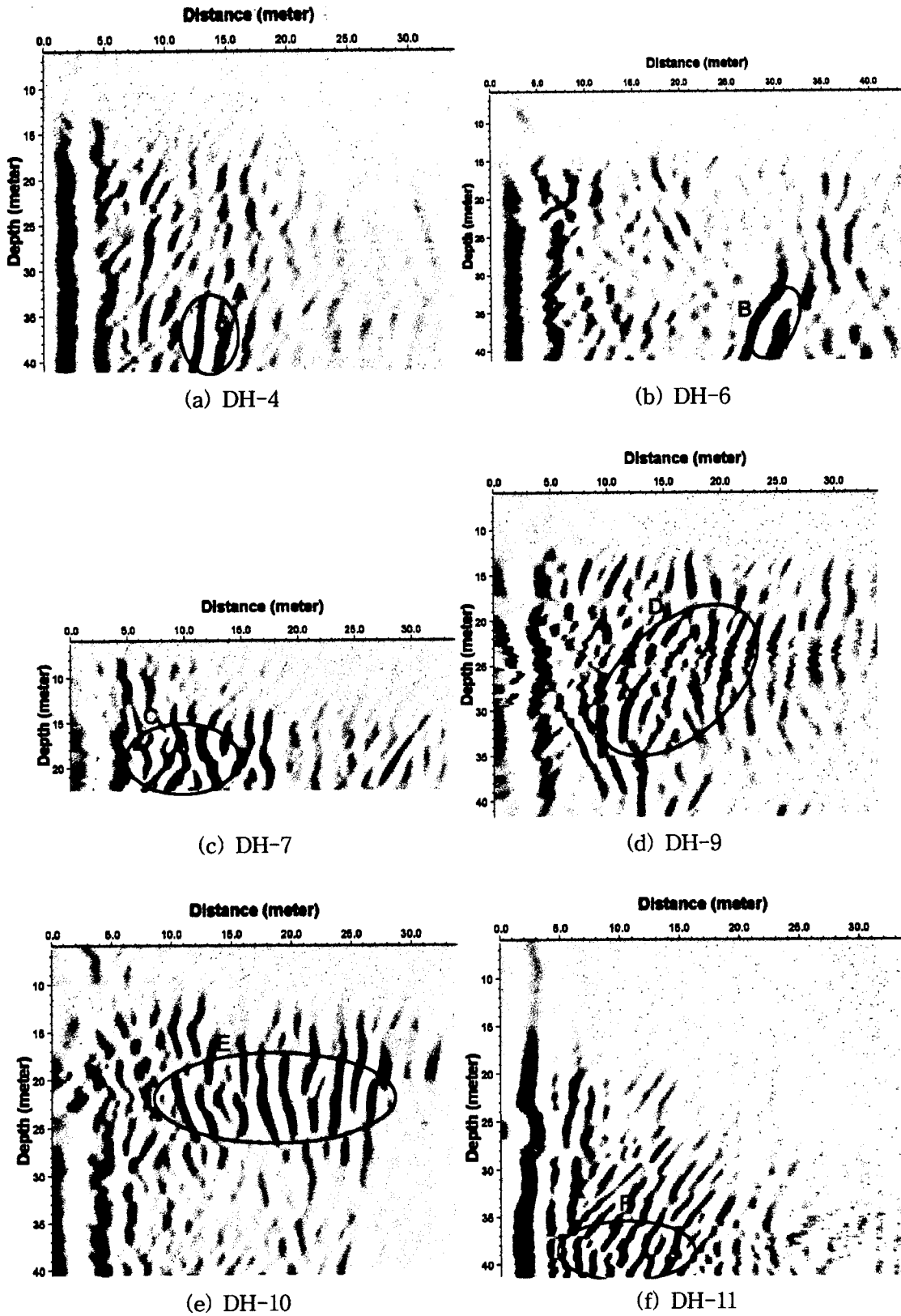


그림 13. 강원도 지역 석회암 공동조사를 위한 시추공 레이더 탐사에 의한 시추공 레이더 반사영상

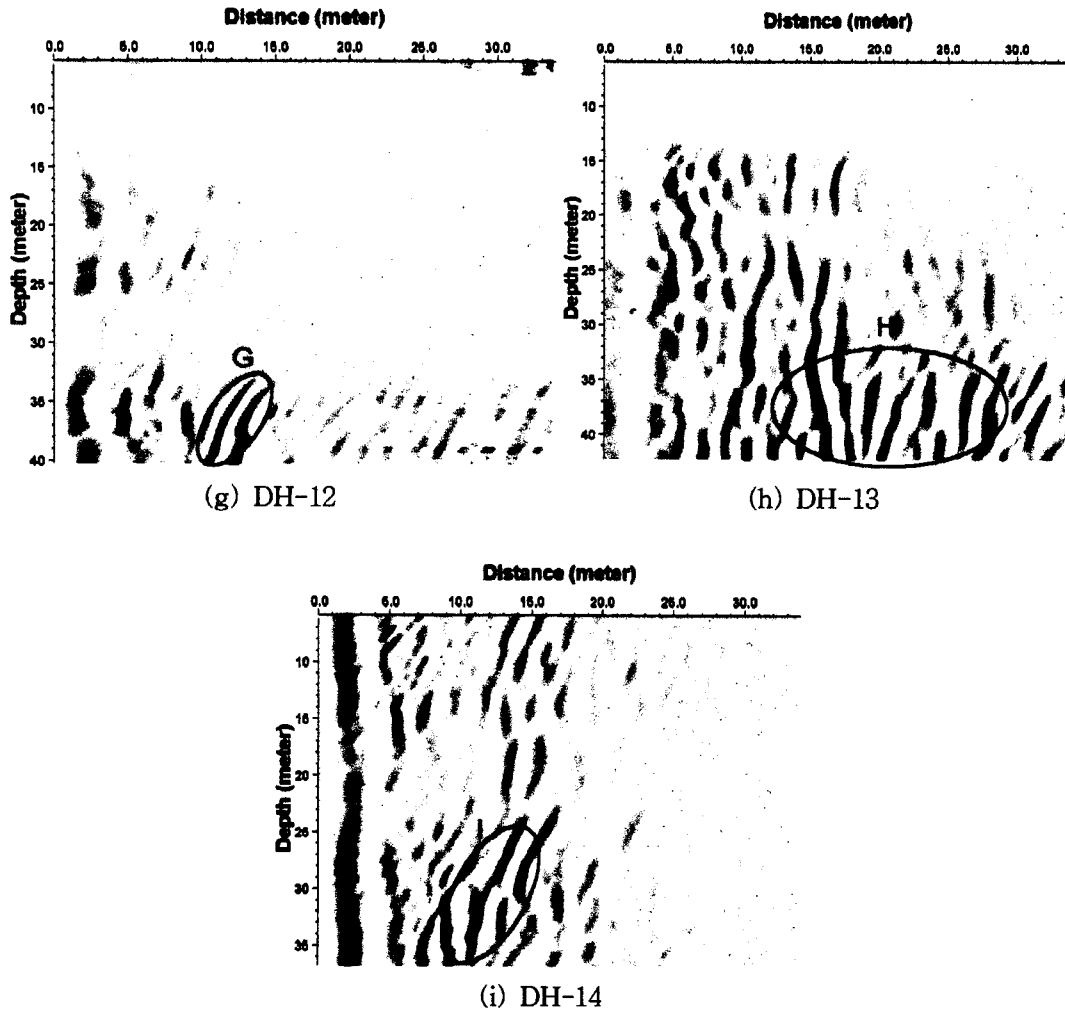


그림 13. (계속)

그림 13은 각 시추공에서 획득한 레이더 반사 영상이다. 그림에 예시한 모든 반사 영상에서 고립되고 불규칙한 형태의 반사체가 매우 강한 반사 에너지를 갖고 출현하고 있다. 이들은 바로 위에서 논한 바와 같은 추론에 의하여 지하에 발달하고 있는 공동의 영상으로 해석된다. 시추공 DH-12의 경우에는 그 규모가 다른 시추공에 비하여 크지 않지만 다른 시추공에서는 상당한 심도 연장을 갖고 발달하는 것으로 나타나고 있다. 또한 시추공 DH-7, DH-9, DH-10, DH-13, DH-14는 2 조 이상의 이상대가 겹쳐져 나타나고 있으며 이는 동일한 위치가 아니라 다른 방향에서 존재하는 공동의 반응이 겹쳐져 나타난 결과로 해석된다.

이와 같은 이상대의 발달심도는 각 시추공마다 약간씩 달라지기는 하지만 일부 심도구간에 밀집되는 경향을 보이고 있으며, 20 ~ 25 m 심도 구간과, 35 m 이하의 두 구간으로 분류된다. 본 지역의 거의 모든 시추공에서 나타나는 이상대는 서로 독립적인 것으로 보기는 어려우며, 서로 연결되어 있을 가능성이 높다. 각 시추공의 영상에서 공동으로 해석되는 이상대의 3 차원적인 정보는 얻을 수 없지만, 시추공으로부터의 거리 및 심도에 대한 정보는 추출할 수 있다. 심도별로 나타나는 이상대가 서로 연결되어 있다는 가정 하에서 각 시추공에서 탐지된 시추공으로부터의 거리를 이용하여 반사파 진폭 이상대의 발달 방향을 추정하여 보았다. 그림 14는 각 심도구간에 탐지된 반사파 진폭 이상대의 예상 발달 방향이다. 35 m 이하에 발달하는 이상대의 발달 방향은 시추공 DH-9에서 파선선으로 표시하였는 바, 예상 발달 진로가 시추공 DH-9 부근을 지나감에도 불구하고 DH-9의 반사법 탐사 영상에서 35 m 이하의 심도에서 감지되지 않았기 때문이다. 이는 진폭 이상을 야기하는 지하구조의 규모가 시추공 DH-9 부근에서

감지되지 못할 정도로 작아졌기 때문으로 해석된다. 이 지하구조는 바로 공동의 발달로 해석되며 레이 다 영상으로 보아 심도방향으로의 규모가 평균 4 ~ 5 m 정도에 달하는 것으로 보인다.

조사지역 중앙부로 수평폭이 15 m 약 정도에 달하는 상당한 규모의 단층이 발달하고 있다. 그림 14의 예상 공동 발달 경로의 방향은 단층의 발달 방향과 거의 일치하고 있으며, 단층 내부가 아닌 단층 외부에 위치하고 있다. 이러한 발달 경향으로 보아, 단층 파쇄대 내의 점토층이 지하수 유동의 차수벽 역할 하여, 단층 외부에 단층 방향을 따른 지하수의 유동에 의하여 공동이 형성, 발달한 것으로 해석된다.

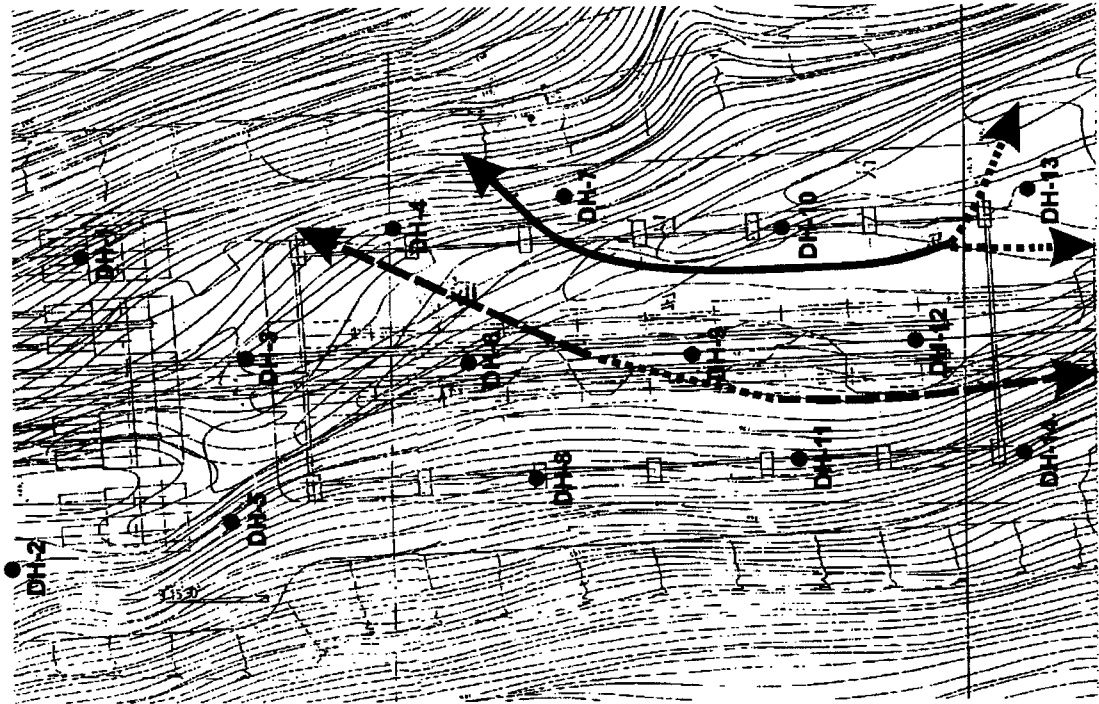


그림 14. 시추공 레이 다 반사 영상으로부터 유추한 지하공동 발달 경로. 실선은 20 ~ 30 m 심도구간에 발달하는 공동이며, 파선은 심도 35 m 이하에 발달하는 공동의 경로로 해석된다.

석회암지대 지하공동 탐지 사례 3

충청북도에서 교량의 교각건설 예정 위치 하부에 발달하는 공동 및 연약대의 분포 파악을 위하여 GPR, 지표 전기비저항, 시추공 레이 다 반사법 탐사 및 토모그래피 등의 종합적인 물리탐사가 수행되었다. 전술한 사례들과는 달리 주로 레이 다 토모그래피 탐사 결과를 위주로 하여 탐사 결과 및 그 해석에 대하여 논한다. 그림 15는 조사가 진행되었던 교각들 중 본 논문에서 논할 교각 5 ~ 11 번의 7 개 교각에 대한 조사 시추공의 위치를 나타낸다.

이 지역의 레이 다 탐사자료는 사례 1과 마찬가지로 이방성을 보여준다. 그림 15의 모든 시추공에 대해 레이 다 반사법 탐사가 실시되었으며, 각 교각의 양단에 시추한 두 시추공을 이용하여 교각의 장축 방향으로 레이 다 토모그래피를 수행하였다. 교각 5 및 6 번은 그 부근에 발달하는 단층의 영향으로 레이 다 파의 감쇠가 심하여 교각의 중앙부에 시추공을 추가하여 3개의 시추공이 형성하는 단면에 대하여 탐사가 진행되었다. 그림 16은 교각 5~11의 7 개 교각의 토모그래피 영상을 서로 비교하기 위해 동일한 속도 기준으로 나타낸 그림이다. 각 토모그램의 왼쪽에는 상행선이, 오른쪽에는 하행선이 위치한다. 교각 11 번에서 5 번으로 가면서 영상은 적색 계열에서 청색 계열로, 즉 레이 다파의 평균속도가 일관적으로 감소하는 양상을 보이고 있다. 이는 11 번 교각으로부터 5 번 교각으로 가면서 그 하부의 암반 상태가 전반적으로 연약해지고 있다는 것을 의미한다. 한편 교량 부근에 단층이 발달하고 있으며, 그의 주향 방향과 교량의 발달 방향과는 약 15~20° 정도가 있음이 지질조사 결과 발견되었다. 이 단층은 교각

11 번에서 5 번으로 가면서 교량에 접근하는 방향으로 발달하며, 그림 2에 나타난 전반적인 경향은 이와 같은 단층의 영향 정도로 설명될 수 있다.

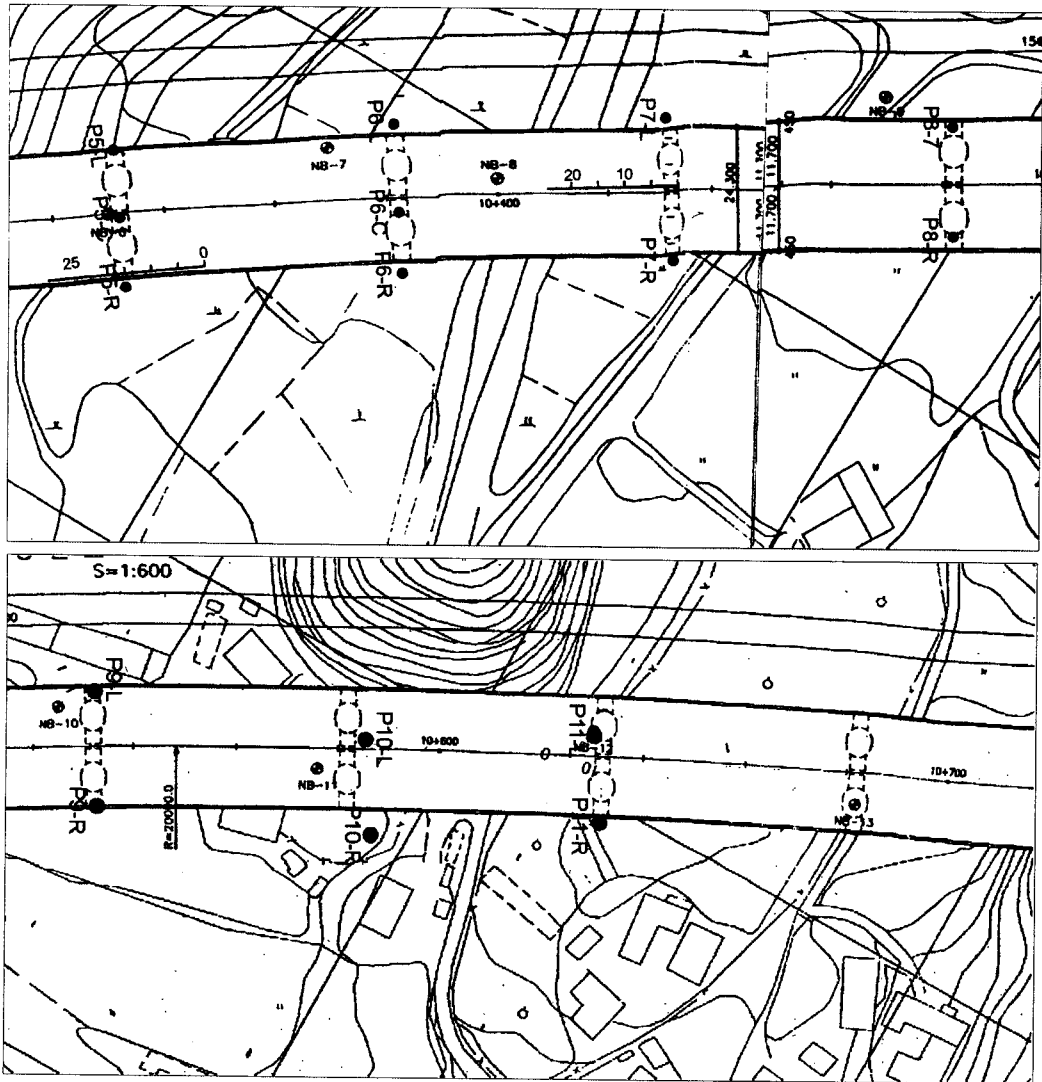


그림 15. 시추공 레이더 탐사가 실시된 교각 및 시추공의 위치.

교각 5 번에서 11 번 사이는 흥미로운 경향을 보이고 있는데, 각 교각 공히 하행선 쪽이 상행선 쪽보다 방향성을 가지고 연약대가 깊이 발달한다. 공동의 발달 빈도 또한 상행선 보다 하행선 쪽이 높다. 만약 이와 같이 동일한 교각에서 하행선 쪽이 상행선 쪽보다 연약할 뿐만 아니라 공동이 많이 발달되어 있다는 점을 고려하지 않고 교량의 교각을 건설할 경우, 하행선 쪽이 지극히 불량한 암반 위에 기초됨에 반하여 상행선 쪽이 상대적으로 양호한 암반 위에 위치하므로 부등침하 발생 가능성까지도 배제할 수 없다.

교량의 교각 5 번에서 11 번 사이의 교각들을 상호 비교하면, 5 번 교각에서 레이더 파의 전파속도가 가장 낮게 나타나나, 6 번 교각이 5 번 교각에 못지 않을 정도로 레이더 파의 속도가 낮으며, 풍화, 파쇄가 심할 뿐만 아니라, 공동의 발달 빈도는 5 번보다 훨씬 높으므로 설계시 가장 주의를 하여야 할 교각으로 해석되었다. 레이더 토모그래피 영상, 시추공 레이더 반사법 영상, 지표 전기비저항 탐사 영상, 시추 자료 등을 종합하여 볼 때에 6, 5, 7, 8, 9, 10, 11 번 교각 순서로 지반의 연약도 순서를 상정할 수 있다.

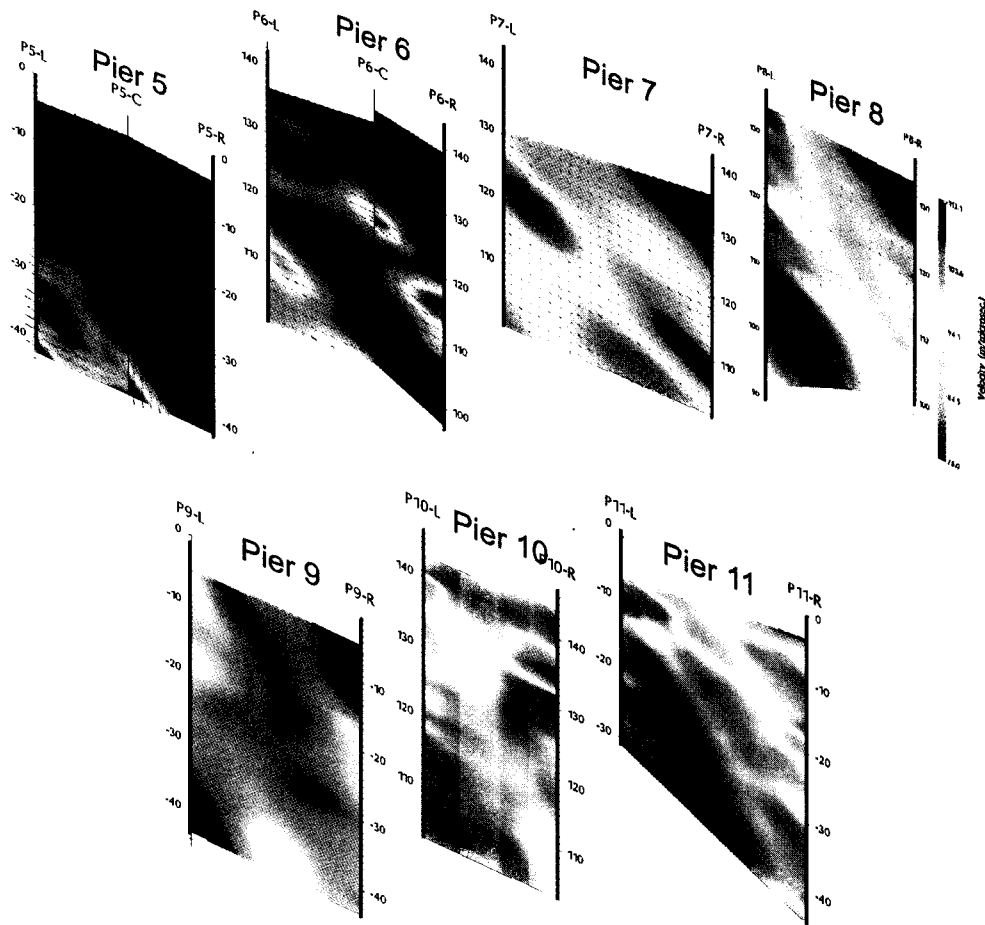


그림 16. 교각 5~11 하부 레이다 속도 토모그래피 영상.

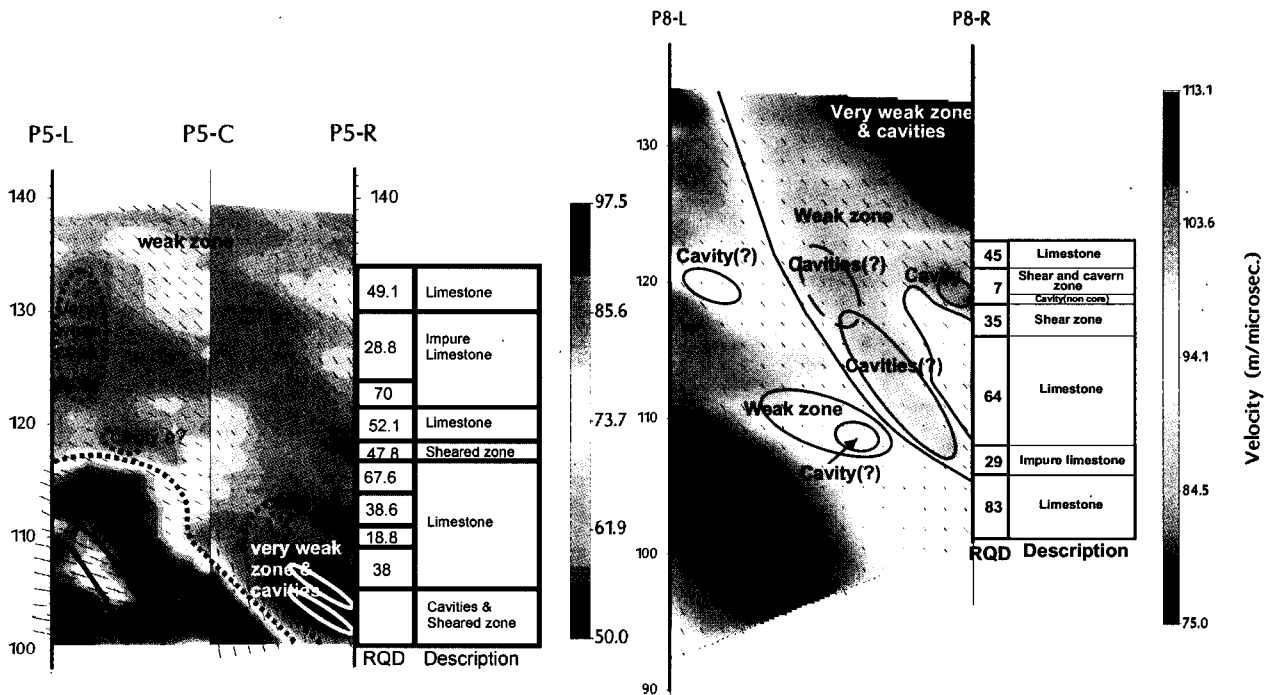


그림 17. 교각 5 번 및 8 번 하부 레이다 토모그래피 영상 및 연약대, 공동의 분포 해석 결과.

본 논문의 주요 주제인 공동 분포 해석에 관하여 살펴보자. 그림 17은 그 해석의 예로서 교각 5 번과 교각 8 번의 레이다 토모그래피 영상에 공동 및 연약대 분포 해석 결과를 함께 나타낸 것으로, 시추공 들 중에서 시추 자료가 존재하는 부분의 RQD 분포를 함께 도시한 것이다. 각 그림에서 추정 공동의 위치 등의 해석은 시추공 레이다 반사법 탐사 영상과 토모그래피 결과를 종합하고, 시추자료를 참고하여 작성된 것이다.

5 번 교각 하부 지반의 특징은 다른 교각에 비하여 매우 연약한 지반으로 볼 수 있으나, 다른 교각에 비하여 공동의 출현 빈도가 오히려 낮다는 점이다. 당 교각에 투입된 3 개의 시추공에서도 공동이 확인된 부분은 P5-R의 최심부에 불과 하다. 이와 같은 사실은 본 지역이 단층의 영향을 받아 이미 파쇄 변질된 이후이기 때문으로 해석된다. 시추에서 확인되지 않은 공동 a와 b는 시추공 레이다 반사법 영상에서 나타난 이상대에 의하여 해석하였다.

위에서 지적한 바와 같이 이 두 교각의 경우에도 하행선 쪽이 상행선 쪽보다 방향성을 가지고 연약대가 깊이 발달하는 것으로 나타나고 있다. 두 교각의 단면에서 공동의 분포는 주로 연약대 쪽에 발달하고 있으나, 연약대에서도 상행선의 비교적 신선한 암반과의 경계면을 따라 주로 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 연약 암반과 비교적 신선한 암반과의 경계면을 따라서 지하수가 유동된 결과로 해석될 수 있다.

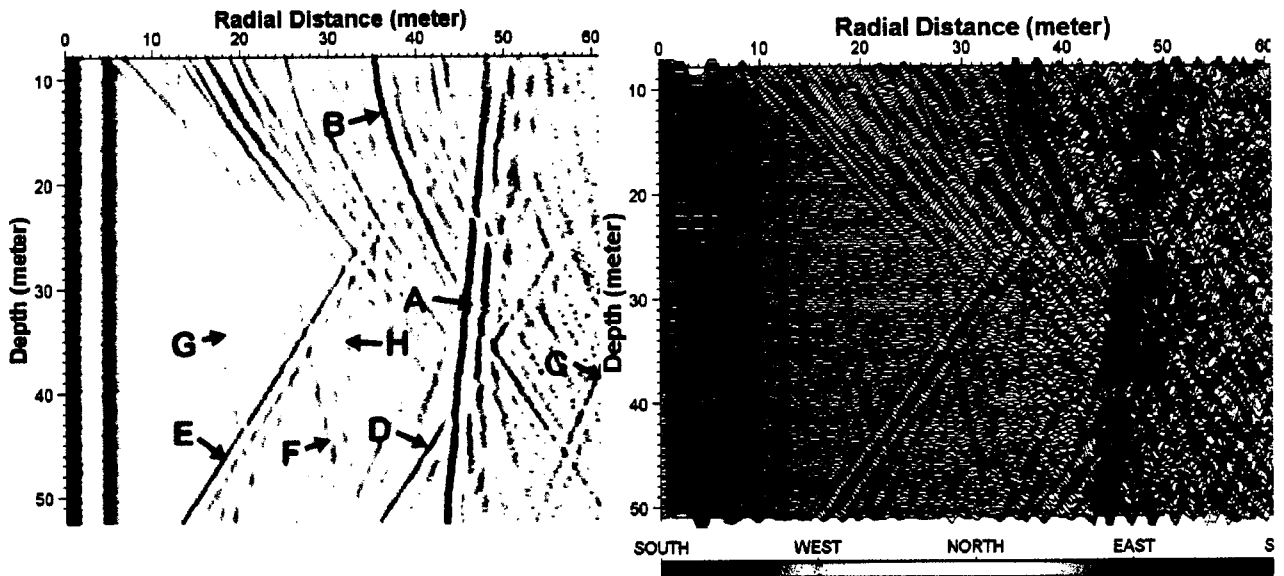
RQD 값과 각 시추공의 속도 분포의 대비에 대하여 살펴보면 저속도를 나타내는 부분은 모두 낮은 RQD 값으로, 고속도층은 모두 높은 RQD 값을 보여주며, 그 상관관계가 매우 높게 나타남을 알 수 있다. 뿐만 아니라 암석의 특성 변화에 의하여 구분한 그 경계 또한 속도 토모그램에서 나타나는 경계면의 위치와 매우 잘 일치하고 있다. 8 번 교각의 경우, 녹색 계열의 저속도대는 RQD 값이 30 이하에 대응되며, 특히 청색으로 나타나는 부분은 RQD 값이 10 이하의 매우 불량한 암반에 대응된다. 한편 붉은 색상으로 나타나는 부분은 RQD 값이 50 이상으로 보여지며 보통암 이상의 암반으로 구분될 수 있을 것으로 보인다. 이와 같이 속도 토모그램에서 곧바로 암석의 RQD의 분포로 변환시킬 수 있을 정도로 속도 분포와 RQD의 분포 사이의 상관도가 높게 나타난다. 그림 상의 암석 구분은 이와 같은 기준으로 하여 작성된 것이다.

방향탐지 안테나를 이용한 시추공 레이다 반사법 탐사 사례 - 파쇄대의 3 차원적인 영상

지금까지 석회암 지대 공동 탐사의 사례를 통하여 시추공 레이다 탐사가 공동 탐지에 매우 탁월한 방법임을 볼 수 있었다. 특히 시추공 레이다 반사법 영상에서는 공동의 수직 연장 및 그 형상까지 영상으로 구현할 수 있으므로 공동 탐사를 위한 매우 분해능이 높은 탐사 방법임을 알 수 있다. 그러나 위에서 지적한 바와 같이 쌍극자 안테나를 채용한 통상적인 시추공 레이다 반사법 탐사는 이상대의 부존 깊이 및 시추공으로부터의 거리에 대한 정보는 제공할 수 있으나, 수평적인 방향에 대해서는 정보를 제공할 수 없다. 좀 더 정확한 해석을 위해서는 시추공에 대한 이상대의 방위각에 대한 정보를 획득할 필요가 있으며, 이에 대한 해답이 바로 방향탐지 안테나를 이용한 시추공 레이다 반사법 탐사이다. 불행히도 공동 또는 터널의 탐사에 방향탐지 안테나를 이용한 탐사법을 이용한 사례가 없으므로 석산 탐사에 적용한 예를 토대로 하여 그의 가능성을 타진하여 보기로 하자.

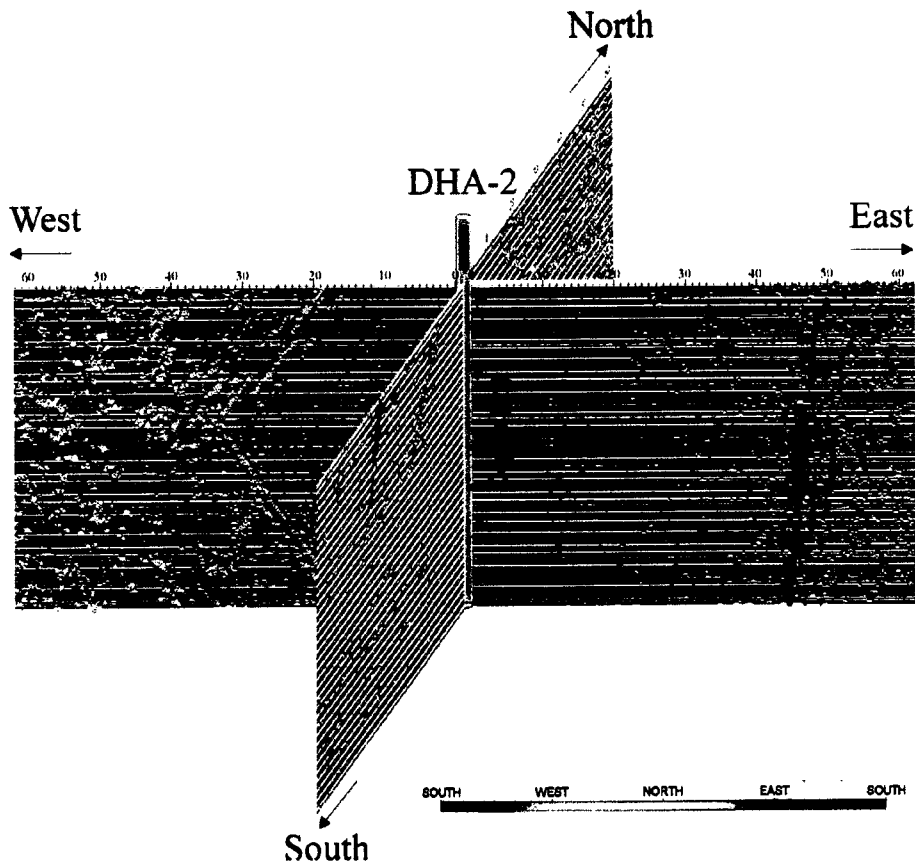
그림 18은 시추공 레이다 반사 영상을 나타낸 것으로 화강암 석산 내의 파쇄대 및 열극대 탐지를 위해 수행된 결과이다(김정호 등, 1997). 그림에서 (a)는 통상적인 쌍극자 안테나를 이용한 반사 영상이며 (b)는 방향탐지 안테나를 이용한 탐사자료에서 얻어진 방위각 정보를 보여주는 영상이다. 영상 (b) 및 (c)는 한국자원연구소에서 개발한 자동 방위각 결정 프로그램을 이용하여 영상화 한 것이다(Kim et. al., 1998; 김정호 등, 1998). 그림 (b)는 방향탐지 안테나 자료로부터 합성된 쌍극자 시계열 신호와, 루프 안테나 신호간의 진폭 및 위상의 차이 등으로부터 계산된 반사파의 입사 방위각을 이용하여 반사파들의 입사 방위각을 영상화시킨 것이다. 그림에서 위글 트레이스(wiggle trace)로 나타낸 부분은 합성 쌍극자 안테나 신호이며, 칼라는 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.

또한 이들로부터 특정 방향의 영상만을 추출할 수 있는 바, 그림 (c)는 그림 (b)를 이용하여 동, 서, 남, 북의 각 방향에 대한 영상을 추출하여 이를 3 차원적으로 도시한 것이다.



(a) 쌍극자 안테나 영상.

(b) 방향탐지 안테나 방위각 영상.



(c) 방향탐지 안테나 자료로부터 추출한 동, 서, 남, 북 4 방향의 레이더 반사 영상.

그림 18. 화강암 내부 파쇄대 탐지를 위해 수행된 시추공 레이더 반사 영상.

그림에서 반사층 A, F, G는 단층 파쇄대이며, C, E는 심부 부존 열극대이다. 한편 반사층 B는 지표의 채석 단애이며, H는 인접한 시추공의 영상이다. 직경이 7.5 cm에 불과한 NX 시추공이 영상으로 감지된다는 사실은 기반암 내부에 안테나가 위치하는 시추공 레이다 반사법 탐사의 탁월한 탐지능력을 잘 대변하여 주고 있다.

예시한 예가 대단히 신선한 암반으로 구성되어 있는 화강암 석산이므로 석회암 공동 탐사와 동일시할 수는 없다. 그러나 위의 사례들에서 살펴본 바와 같이 석회암이 비교적 신선한 경우에는 공동에 의한 반사파는 대단히 큰 반사 에너지를 갖고 전달되며, 따라서 방향탐지 안테나의 경우에도 매우 높은 S/N 비를 갖는 자료의 획득이 가능할 것으로 생각된다. 그러므로 공동 탐사에 있어서 방향탐지 안테나를 이용한 탐사를 병행한다면 공동의 3 차원적인 부존 상황에 대한 정보 내지는 영상의 획득이 가능할 것으로 기대된다.

결 론

시추공 레이다 탐사는 레이다 토모그래피와 아울러 시추공 내에서 반사법 탐사가 가능한 방법이며, 따라서 지하구조를 두 종류의 원리를 이용하여 조명할 수 있는 탐사기술이다. 뿐만 아니라 방향탐지 안테나를 이용할 경우, 1 개의 시추공 탐사자료에서 360 도 전 방향의 영상을 획득할 수도 있다. 본 논문에서는 이와 같은 3 종류의 시추공 레이다 탐사법의 원리를 설명하고, 토목건설을 위한 석회암 지역에서의 공동탐사 사례에 대하여 설명하였다. 또한 방향 탐지 안테나를 이용한 레이다 반사법 탐사를 석산 탐사의 사례를 이용하여 설명하였다. 공동이나 터널 탐지에 있어서 본 논문에서 다루었던 3 종류의 시추공 레이다 탐사를 종합 적용하면 공동의 3 차원적인 부존 상황에 대한 정보 내지는 영상의 획득이 가능할 것으로 생각된다.

지금까지 사례를 통하여 논한 바와 같이 시추공 레이다 탐사는 기반암 내의 공동 탐사를 위해서 매우 높은 고분해능 영상을 제공하여 줄 수 있으며, 그 위치뿐만 아니라 그 형상까지도 영상화할 수 있다. 그러나 시추공 레이다 탐사는 적합한 조건하에서만 소기의 목적을 달성할 수 있다는 점을 주의하여야 한다. 레이다 파를 이용한다는 점에서 전자파의 감쇠가 심한, 즉 전기전도도가 높은 지역에서는 고분해능 영상을 획득하기 어렵다. 예를 들어 염수가 침입한 기반암의 경우에는 비록 기반암 내에 안테나가 위치한다고 하더라도 레이다 파가 멀리 전파될 수 없으며, 레이다 탐사가 불가능해진다. 그러므로 탐사를 적용하기 전에 조사지역의 특성 분석을 통하여 탐사가 가능한지를 검토함이 선행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 김정호, 정승환, 조인기(1996), 암반내 레이다 탐사를 위한 암석의 유전율 측정, 한국자원공학회지, 33 권, 5 호, pp. 383-390.
2. 김정호, 조성준, 이명종, 정승환(1998), 방향탐지 안테나를 이용한 시추공 레이다 반사법\탐사에 있어서 반사층 방위각의 자동 결정, 물리탐사, 1 권, 3 호, pp. 176-182.
3. 김정호, 조성준, 이명종, 정승환, 이희일, 신인철(1997), 화강암 지역 석산지역에서의 시추공 레이다 탐사-경기도 포천군 동아석재-, 석재자원조사연구, KR-97(C)-9, p. 275-376, 한국자원연구소.
4. Cho, Seong-Jun, and Kim, Jung-Ho(1997), Radar travelttime tomography in anisotropy media - in the application of limestone area, EAGE 59'th Conference and Technical Exhibition.
5. 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.
6. Jung, Y, Song, M. and Kim, J.(1998), Application of Anisotropic Georadar Tomography to Monitor Rock Physical Property Changes Due to Excavations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, edited by J. A. Hudson, v. 35, no. 4/5, pp. 599 - 600.

7. Kim, Jung-Ho, Cho, Seong-Jun and Chung, Seung-Hwan(1998), Three-dimensional imaging of fractures with direction finding antenna in borehole radar survey, Proceedings of the Fourth SEGJ International Symposium-Fracture Imaging-, pp. 291-296.
8. Mundry, E., Thierbach, R., Sender, F., and Weichart, H.(1983), Borehole radar probing in salt deposits, Sixth International Symposium on Salt, v. 1, pp. 585 - 599.
9. Thierbach, R.(1991), Personal communication.