

석회암 공동지대 안전을 위한 지구물리탐사 기법에 관한 소개

김 정 호 (한국지질자원연구원)

1. 서론

대부분의 사람들은 석회암 동굴이라 함은 갖가지 신비스러운 형상을 갖는 종유석, 석순 등으로 구성된 자연의 신비를 연상한다. 석회암 동굴이란 말 그대로 석회암 내에 발달하는 동굴을 총칭하며 지하수 용식 작용에 의한 결과임은 기본상식에 속한다. 때문에 석회암 동굴은 단단한 암반 내에서만 발달하는 것이 아니라 암반을 뒤덮고 있는 토양층과 연결되어 발달함 또한 자연스러운 현상이며, 그림 1에 도식적으로 나타낸 바와 같이 토양층의 함몰, 즉 지반침하를 발생시키기도 한다. 지표수에 의한 석회암의 용식에 의하여 형성된 카르스트 지역의 가장 대표적인 지형인 돌리네(doline) 지형은 그림 1과 같은 석회암 공동에 의한 지표 침하의 결과이다. 그림 2에 예시한 지형도는 석회암 내에 수많은 동굴이 형성되어 이들이 모두 함

몰하여 지표가 거의 곰보 형태로 변한 모습을 보여주고 있다. 이와 같은 석회암 동굴의 함몰에 의한 지반 침하는 과거에 모두 종결된 사건이 아니라 지금도 진행되는 현상이다. 그 한 예가 강원도 정선의 발구덕 마을이며, 밭을 갈던 소의 밭이 새로이 형성된 소규모 구덩이에 빠지기도 하는 지역이다.

석회암 동굴은 석회암 지역이면 그 발달빈도의 차이가 있을 뿐 어느 지역에서도 형성될 수 있으며 따라서 인구가 밀집한 도시 하부에서도 발달한다. 인구 밀집지역에 석회암 동굴에 의한 지반침하가 일어날 경우에는 막대한 재산손실과 인명 피해까지 발생할 수 있으므로 이 경우에는 석회암 동굴은 더 이상 아름다운 자연이 아니며 심각한 재해를 유발할 수 있는 인자로 탈바꿈한다. 실제로 남아프리카 금광지역에서 석회암 공동에 의한 지반침하가 발생하였으며 그 결과 수백개의 구멍(sinkhole)이 발생하고 38명이 사

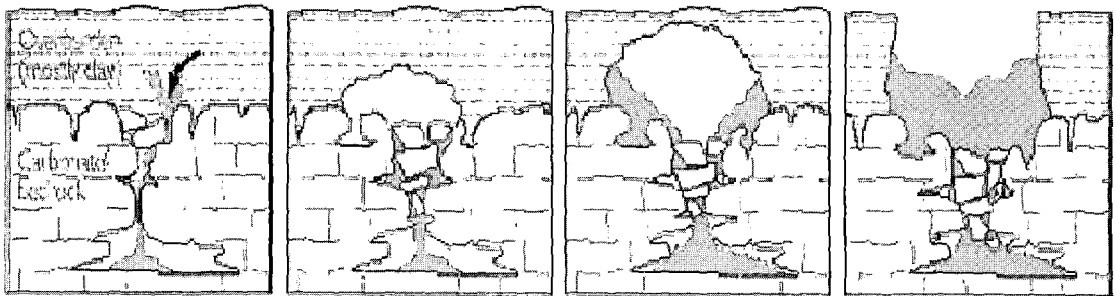


그림 1. 석회공동에 의한 지반 침하 과정의 모식도

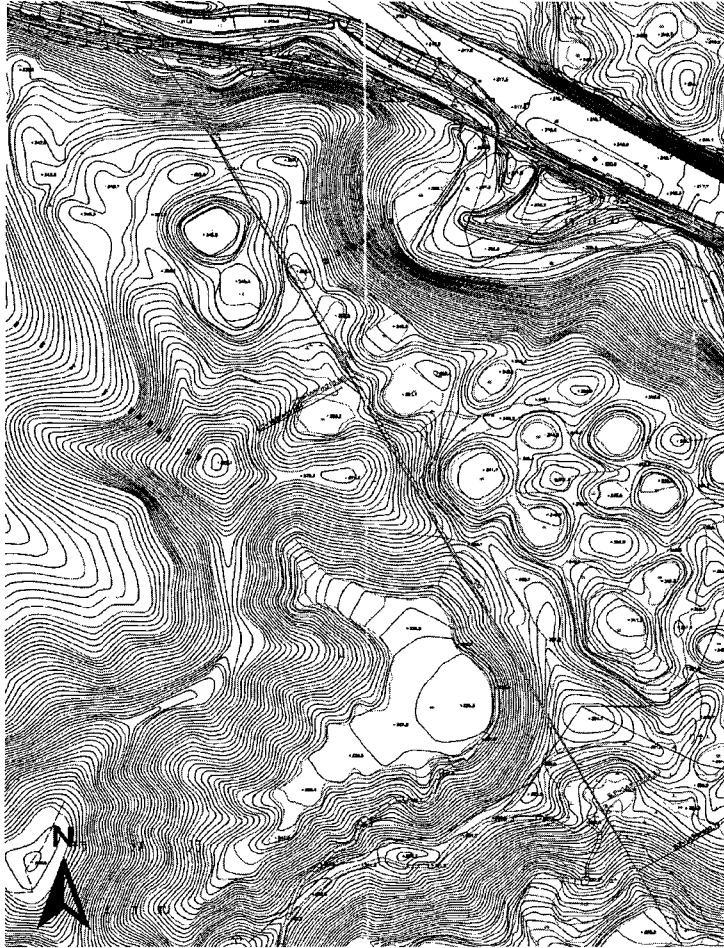


그림 2. 돌리네가 밀집하여 발달하는 국내 한 지역의 지형도. 지형도 우상부에 발달하는 다수의 원형 등고선은 모두 석회암 공동 함몰에 의해 형성된 돌리네에 대응되며 하단부 중앙의 “ㄱ”형태의 넓고 평탄한 지역 또한 돌리네이다.

망, 100채 이상의 건물이 붕괴된 바가 있다. 이와 같이 인구밀집지역에 재해를 야기시키는 급격한 지반침하는 과도한 지하수의 채취에 의한 지하수위의 하강, 터널 굴착, 대형 구조물의 건설에 의한 하중의 증가 등과 같은 인위적인 요인에 의하여 역학적인 평형상태가 깨어질 때에 발생하는 경우가 많다. 실제 위에 예를 든 남아프리카의 지반침하 사례 또한 과도한 지하수의 채취에 의한 것이었다. 국내의 한 지역에서도 가옥의 붕괴까지 발생시킨 지반침하가 이미 언론에 보도된 바 있으며, 조사결과 석회암 공동의 함몰이

주원인이었고, 인구의 급격한 팽창에 의한 지하수의 과도한 채취가 이를 촉진시킨 것으로 밝혀졌다.

석회암 지역에 대규모 토목 구조물을 건설할 때는 반드시 석회암 공동에 의한 침하 가능성에 대비하여야 한다. 특히 고속도로, 철도 교량 또는 터널은 붕괴될 경우에는 막대한 인명 피해까지 유발할 수 있으므로 반드시 이에 대한 대비가 필요하다. 대비에 가장 중요한 시발점은 물론 석회암 공동의 유무이며, 공동이 존재하는 경우에는 그 규모와 위치 등을 조사함이 된다. 석회암 공동은 공간적인 연속성 특히 수평적인

연속성이 거의 없이 불규칙한 형태로 발달하므로 시추조사 만에 의한 판단은 대단히 위험할 수 밖에 없다. 실제로 필자가 1990년대 후반 수 차례에 걸쳐 수행한 석회암 공동 탐사는 모두 시추 조사 결과 공동이 없다고 판단되어 토목공사를 시작하였으나 현장 터파기 공사에서 다수의 공동이 발견되어 실시한 것들이다. 이와 같은 석회암 공동의 발달양상을 고려할 때, 물리탐사는 시추조사와는 달리 1점이 아닌 조사 지역 하부의 연속적인 지하 정보를 얻는 방법이라는 측면에서 석회암 공동 탐사에 대단히 중요한 위치를 차지한다.

이 글에서는 필자가 국내에서 수행하였던 탐사결과를 이용하여 석회암 공동의 탐지를 위한 물리탐사 방법에 대하여 서술하고자 한다. 필자의 주 연구 분야가 전기비저항 탐사와 레이더 탐사이며, 국내에서 가장 많이 사용되는 방법이 전기비저항 탐사이므로 이 두 방법에 대하여 고찰한다. 석회암 공동탐사를 위한 물리탐사라고 하더라도 지하수, 지반조사 등을 위한 물리탐사방법과 차이가 있을 수 없다. 그러나 석회암 공동이라는 적용 목적의 특수성 때문에 탐사의 설계, 특히 해석 방법에 차이가 있다. 물리탐사는 물성 분포로써 지하구조를 영상화하는 방법이므로 단순히 주변과는 물리적인 성질이 다른 이상대가 존재한다는 것만을 이야기할 뿐, 그 이상대가 석회암 공동인가에 대해서는 알 수 없으며 이는 전적으로 해석자의 시각에 의존한다. 이 글에서는 탐사방법 자체에 대한 서술보다는 각종 탐사 영상의 해석에 중점을 두어 서술을 진행한다.

2. 지하 단면의 영상화 방법으로서의 2차원 전기비저항 탐사

물리탐사 전문가들은 탐사 의뢰자로부터 눈으로 보듯이 지하를 볼 수 없느냐는 질문을 가끔 접할 때

가 있다. 우리가 눈으로 사물을 인식하는 기본은 물체의 겉 표면에서 반사된 빛에 있다. 그리고 우리는 반사된 빛에 의하여 인식한 물체의 모양, 색 등을 두뇌에 저장되어 있는 과거의 인식 기록에 비추어 봄으로써 바라보는 물체가 무엇인지를 판독한다. 그러나 만약 우리가 과거의 인식 기록을 전혀 갖고 있지 않다면, 혹은 지구를 떠나서 전혀 다른 세상에 간다면, 눈으로 본 물체의 모양과 색깔 만을 알 수 있을 뿐 그 물체가 무엇인가는 알 수는 없다. 지하구조 또한 마찬가지로 볼 수 있다. 이와 같은 측면에서 단순히 모양을 인식하는 것보다는 대상물체가 어떠한 물리적인 특성을 갖고 있는가를 -여기서는 전기비저항- 아는 것이 그 물체가 무엇인가를 판독하는 데에 더욱 큰 도움을 줄 수 있다.

2차원 전기비저항 탐사는 측선 직하부의 지하 단면을 전기비저항 분포로써 영상화하는 방법이며, 영상을 해석하기 위해서는 탐사대상 물체의 전기비저항에 대한 정보를 가지고 있어야 한다. 일반적으로 토양층은 수십~수백 ohm-m 정도의 낮은 전기비저항을, 이에 반해 신선한 석회암은 수천 ohm-m 이상의 높은 전기비저항을 나타낸다. 주관심사인 지하 공동은 비어 있을 경우와 물이나 진흙으로 채워져 있을 경우로 나눌 수 있으며 비어 있는 경우보다 채워져 있는 경우가 오히려 더 많다. 내부가 비어 있을 경우에는 공기가 부도체이므로 전기비저항 영상에서는 매우 높은 전기비저항 이상대로, 물이나 진흙으로 채워져 있는 경우는 주변보다 낮은 저비저항 이상대로 나타날 것이다. 기반암 내부에 비어 있는 공동이 발달할 때는 고비저항 내부에 더욱 높은 비저항 이상대로 영상화될 것이므로 판독이 상대적으로 어렵다. 이에 반해 물이나 진흙으로 충전되어 있을 경우, 고비저항 내에 저비저항 이상대로 나타나므로 상대적으로 쉽게 확인할 수 있다. 그러나 기반암 내에 발달하는 파쇄대나 변질대 또한 저비저항으로 영상화되므로 이에 대한 구별이 필요하며 시추조사 결과와 조사지역의

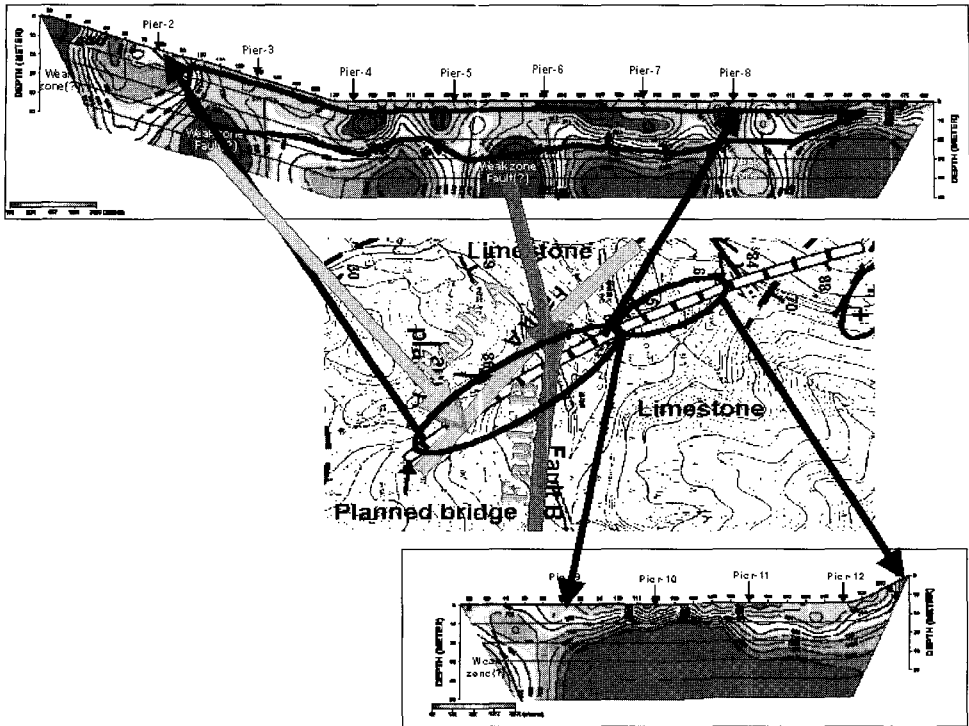


그림 3. 국내 고속도로 교량 건설 부지에서 석회암 공동 탐지 목적으로 수행한 전기비저항 탐사 결과. 흑색 화살표는 영상에서의 축점 위치를 의미하며 계획 교량에 덧붙여 표시한 짧은 선분은 교각의 위치를 의미한다. 상부 영상에 수직으로 발달하는 두 저비저항 이상대는 단층 A와 B가 영상화 된 것이다.

지질에 대한 알려진 정보를 모두 동원하여 저비저항 이상을 해석하여야 한다.

그림 3의 상부 영상에서는 축선의 거의 대부분 구간에서 심도 약 25m까지 300ohm-m 이하의 저비저항대가 발달하고 있으며, 이 부분은 토양층 또는 풍화토로 해석할 수도 있으며, 기반암내의 연약대로도 해석할 수 있다. 토모그래피 탐사를 위한 시추조사 결과에 의하면 이 지역의 기반암은 5~8m 내외에서 출현하며, 시추에 의해 확인된 공동은 대부분 그 내부가 점토 등으로 충전된 상태이다. 그러므로 그림에 다각형으로 표시한 청색 내지는 녹색으로 영상화된 부분은 기반암의 특성변화를 의미하며, 풍화도가 아니라 기반암 내에 발달하는 풍화암 혹은 변질대 등의 연약대를 의미함을 알 수 있다. 풍화대나 변질대는 파쇄 혹은 변질이 심하게 진척되어 지하수의 좋은

유동 경로가 되며 공동의 발달 가능성이 높다. 또한 일반적인 풍화암내에서는 전기비저항 영상에 타원으로 표시한 부분과 같이 고립된 형태의 매우 전기비저항이 낮은 이상대가 발달할 가능성은 매우 낮다. 그러므로 타원으로 표시한 저비저항 이상대가 바로 조사축선 하부에 발달하는 공동 또는 소규모 공동의 집합체로 해석할 수 있는 것이다.

단층 파쇄대는 지하수 유동의 좋은 통로가 될 수 있으며 따라서 공동이 발달할 가능성이 높다. 또한 단층의 충전 물질이 불투수성인 점토가 주인 경우에는 지하수 흐름에 대한 장벽의 역할을 할 수 있으나, 바로 이 때문에 단층 주변의 지하수 흐름을 촉진시킬 수 있다. 그림 3의 상부 영상에는 많은 이상대가 영상화되어 있는 반면에 두 단층에서 상대적으로 떨어진 축선에서의 전기비저항 영상인 아래 그림에는 매우

높은 고비저항이 주로 분포하고 있다. 이는 단순히 공동의 발달 빈도가 상대적으로 낮다는 사실을 의미할 뿐만 아니라 이 지역의 공동 발달을 제어하는 가장 중요한 인자가 바로 단층임을 말해 주고 있다.

3. 지하 3차원 영상화 기법으로서의 3차원 전기비저항 탐사.

두개의 나란한 측선에서 획득한 전기비저항 영상에서 비슷한 형태의 단층과 파쇄대 등의 연약대가 동시에 영상화되어 있다면 특별한 이유가 없는 한 두 이상대가 연결되어 있다고 해석함이 보통이다. 또한 그 연장선상에 연약대가 존재한다고 해석하며 이는

대부분의 지하 지질구조는 수평적인 연장성을 갖는 것이 일반적이기 때문이다. 그러나, 석회암 공동의 경우는 이와 같은 가정이 일반적으로 성립할 수 없는 불규칙한 형태로 발달하며, 특히 지하 천부까지 연장되어 발달하여 재해를 유발할 수 있는 공동은 지표수의 유입에 의하여 형성된 것이 많기 때문에 수직적인 연장성을 보여줄 경우가 많다. 그러므로 탐사 측선에 수직방향으로는 지하 물성이 변화하지 않는다는 가정을 바탕으로 둔 2차원 탐사 영상에는 석회암 공동과 같은 3차원 이상대는 심하게 왜곡되어 있을 가능성이 매우 높다. 뿐만 아니라 나란한 두 측선에서 석회암 공동으로 해석할 수 있는 이상대가 확인되지 않았다고 하더라도, 두 측선 사이에도 공동이 배태되어 있

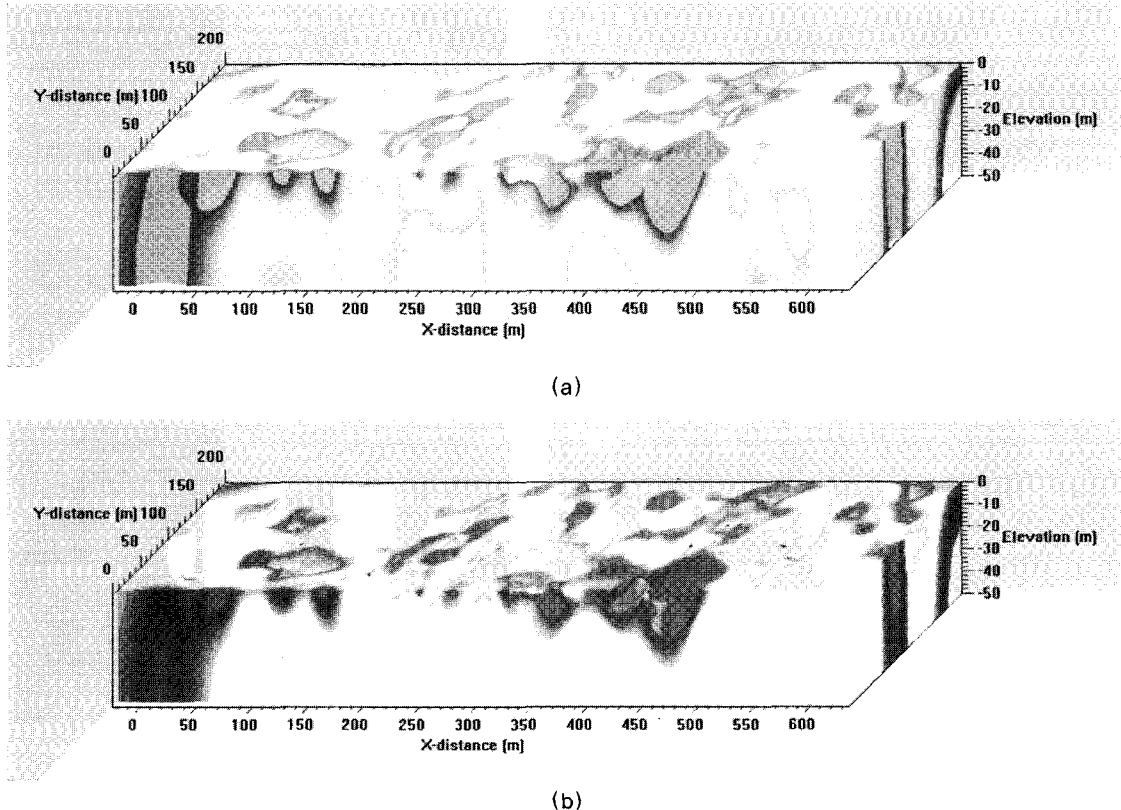


그림 4. 터널 건설을 위하여 석회암 지대에서 수행한 3차원 전기비저항 탐사 영상의 예. (a) 3차원 전기비저항 영상. (b) 저비저항대의 3차원 분포 상황. 저비저항대의 발달이 수직적인 형태를 보여주고 있으며 그 발달지역은 그림 2의 돌리네 지형의 분포상황과 일치하고 있다.

지 않다고 단언하기는 매우 힘들다. 이와 같은 석회암 공동 발달의 3차원적인 특성에 탐사의 어려움이 있다. 그러므로 정확한 조사를 위해서는 지하를 3차원적으로 영상화하는 3차원 탐사가 필요하다.

그림 4는 그림 2의 돌리네 밀집 지역 일부를 관통하는 철도 터널 건설 부지에서 석회암 공동 탐사를 위하여 수행한 3차원 전기비저항 탐사 결과이다. 돌리네 지형은 지표 천부까지 연장된 석회암 공동의 함몰 결과이므로 기반암에 구멍이 뚫린 형태로 발달되어 있을 것이며, 또한 그 주변부 또는 수직 연장 선상에 아직 함몰되지 않은 공동이 남아 있을 가능성이 매우 높다. 그림 4는 그와 같은 형태를 잘 보여주고 있으며 특히 몇 개의 축선을 이용하는 2차원 탐사만을 적용하였을 때 탐지할 수 없는 부분이 많을 수 있음을 잘 대변하고 있다.

4. 지하 고분해능 영상 획득방법으로서의 전기비저항 토모그래피 탐사

육안으로 물체를 관찰할 때에 거리가 멀어질수록 식별능력이 떨어지며 식별할 수 있는 물체의 최소 크기는 증가한다. 이러한 점은 물리탐사에서도 마찬가지이다. 그러나 물리탐사, 특히 전기비저항 탐사의

경우에는 그 정도가 훨씬 심하다. 예컨대 지하 30m 하부에 있는 1~2m 정도의 크기를 갖는 석회암 공동을 영상화함은 전기비저항 탐사로서는 사실상 불가능하다. 그림 3의 지표 전기비저항 탐사 영상에서 천부는 비교적 등고선이 자세한 반면, 심부에서는 매우 부드러운 경향을 갖는 것은 바로 이 때문이다. 이 한계를 벗어날 수 있는 방법은 탐사대상 물체에 가까이 다가가는 것 밖에 없으며, 시추공을 이용한 토모그래피 탐사가 바로 그것이다.

국내의 한 소도시에서 가옥의 바닥이 20m 이상 함몰하는 사태가 발생하였다. 그림 5에 예시한 사진 이외에도 상당히 넓은 지역에서 가옥의 심한 균열 현상이 발생하는 등, 피해 범위와 규모가 상당히 컸다. 이의 원인 규명과 대책 수립을 위하여 종합적인 탐사를 실시하였으며, 그 중 가장 중요한 역할을 담당한 것이 전기비저항 토모그래피이고 탐사물량은 42단면에 달한다. 이 지역에 전기비저항 토모그래피를 적용한 것은 지하 고분해능 영상을 획득함에 가장 큰 목적이 있었지만, 이와 같이 많은 물량의 토모그래피 탐사를 투입한 것은 인구밀집 지역일 뿐만 아니라 거의 모든 도로가 포장되어 있어서 일반적인 지표물리탐사의 적용범위가 극히 제한적이었기 때문이었다.

그림 6의 토모그래피 영상은 그림 5 (a)의 함몰 구덩이를 메운 후 얻은 영상으로써 중앙 부위의 함몰



(a)



(b)

그림 5. 국내 모지역에서 발생한 석회암 공동에 의한 지반침하 현장 사진
(a) 함몰한 구덩이, (b) 심한 피해를 입은 가옥들을 철거한 후 탐사하는 광경

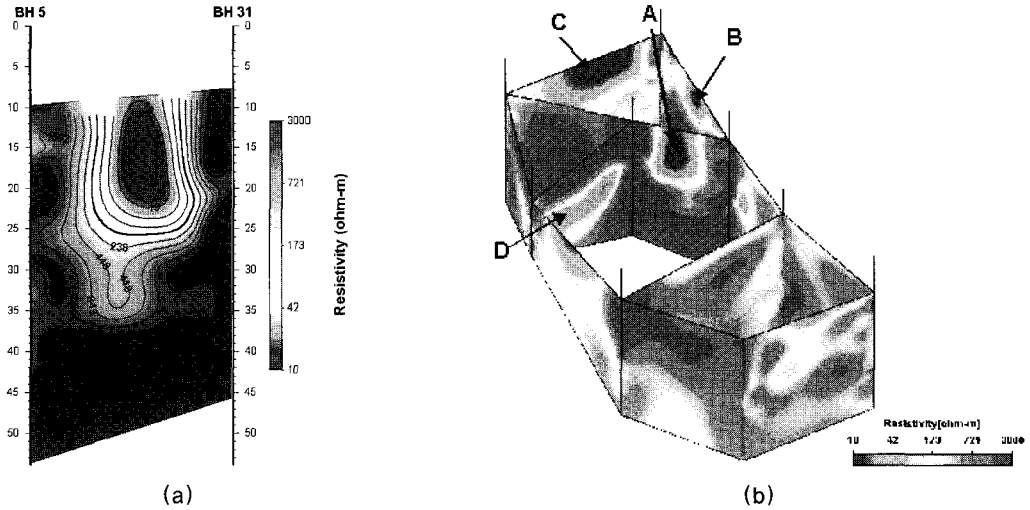


그림 6. 전기비저항 토모그래피 영상 예.
 (a) 그림 5 (a)의 함몰 구덩이를 중심으로 한 영상. (b) 12개의 토모그래피 영상을 fence diagram 형태로 3차원적으로 나타낸 모습.

구덩이 모습을 뚜렷하게 재현하고 있다. 3차원 fence diagram 그림 6(b)에서 A는 그림 6(a)에 대응되는 부분이다. 그림에 A, B, C, D로 표시한 이상대 중 D는 시추에 의하여 주로 물로 차 있는 공동입이 밝혀졌으며, D를 제외한 나머지 세 이상대들은 모두 지표 천부 분지형태를 보여주고 있음이 특징적이다. 이들 세 이상대들은 그 모양과 전기비저항으로 볼 때에 모두 점토로 충전되어 있으며 지표수의 유입에 의한 석회암의 용식 잔존물이 침전된 상태인 것으로 생각할 수 있다. 그러나 비록 점토로 충전된 상태라 하더라도 그 상부가 연약한 풍화토 또는 풍화암으로 구성되어 있으므로 지하수의 과다 pumping 등의 이유로 점토의 일부가 유실될 경우 지반이 침하할 가능성이 매우 높다. 실제 종합 조사 결과 이 지역에서 1990년대 이후 가옥의 균열과 함몰 등 지반침하에 의한 피해가 급증한 것은 바로 석회암 공동과 급속한 인구 팽창에 의한 지하수 과다 채취인 것으로 밝혀졌다.

그림 6에서 나타나는 또 다른 특징은 이들 이상대가 그림의 윗 부분에 집중되어 있으며 하부 4 개의 시추공을 이용한 토모그래피 영상에는 뚜렷한 이상대가 보

이지 않는다는 점이다. 이는 이들 4 개의 시추공이 모두 석회암이 아닌 화강암으로 구성되어 있다는 사실에서 이해할 수 있으며, 탐사 결과에 의하여 이들 시추공 사이에는 공동존재 가능성이 매우 낮음을 알 수 있다.

5. 시추공 레이더 탐사

- 레이더 반사법 탐사와 토모그래피 탐사

지하의 불균질 매질의 경계면에서 반사된 파동을 이용하는 탄성파 반사법 탐사, GPR 탐사 등을 이용하면 전기비저항 탐사에 비하여 훨씬 높은 분해능을 갖는 지하구조 영상을 획득할 수 있다. 그러나 우리나라 지질 특성상 탄성파 반사법 탐사를 이용하여 기반암 내부에 발달하는 공동을 영상화하기는 상당히 어려우며, 실제적으로 국내에서 성공 사례를 찾기 어렵다. 고주파수의 전자기 파를 이용하는 GPR 탐사는 분해능이 매우 높고 탐사가 손쉽다는 장점을 갖고 있으나, 암반이 지표에 노출되지 않고 10m 내외의 토양층이 존재하는 상황을 가정할 때에 GPR 탐사를 이

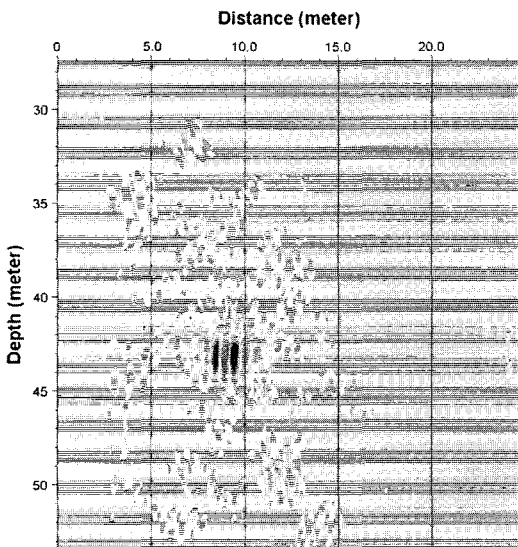
용하여 기반암 내에 발달하는 석회암 공동을 탐지하기는 매우 어렵다. 물론 토양층의 두께가 매우 얇은 경우 기반암 내에 발달하는 공동을 탐사하거나 혹은 토양층 내부까지 함몰이 진행되어 토양층 내에 발달하는 공동을 탐지하는 데에 GPR 탐사는 매우 유용한 방법이 될 수 있다.

기반암 내에 발달하는 공동을 탐사하는 물리탐사 방법들 중 시추공 레이더 탐사는 분해능이 가장 높은 영상을 제공해 줄 수 있는 방법이다. 그러나 기반암의 전기비저항이 매우 낮아 전자기 파의 감쇄 현상이 심할 경우에는 이 방법을 적용할 수 없다. 앞절의 사례에서 시추공 레이더 탐사를 적용하지 않고 전기비저항 토모그래피를 적용한 것 또한 바로 이 때문이다.

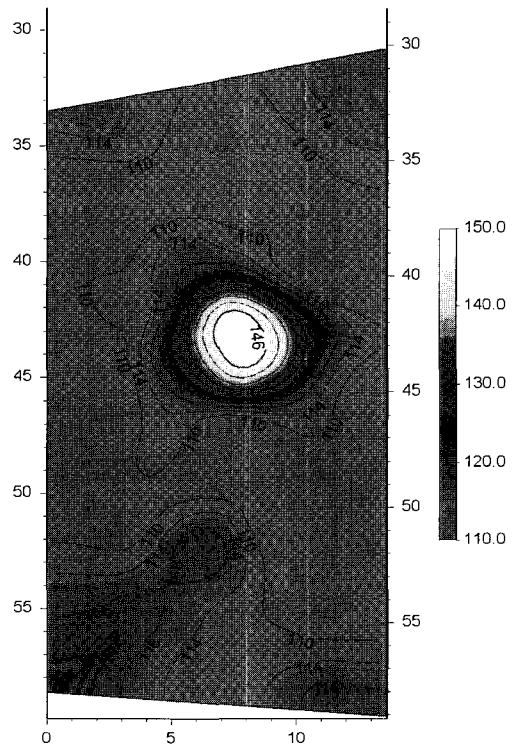
시추공에서 수행하는 레이더 탐사는 레이더 반사

법 탐사와 토모그래피 탐사로 나뉘어진다. 레이더 반사법 탐사는 GPR 탐사와 그 원리가 동일하며 차이는 GPR 탐사가 지표의 측선 상에서 자료를 획득하는 반면 시추공 반사법 탐사는 시추공에서 수행한다는 것 뿐이다. 레이더 토모그래피는 탄성과 토모그래피 탐사와 거의 유사하며 단지 고주파수의 전자기파를 사용한다는 점이 다를 뿐이다.

시추공 레이더 반사법 탐사는 불균질대의 경계면을 명확하게 그려줄 수 있는 반면에 물성에 대한 정보는 얻을 수 없다. 이에 반해 토모그래피 영상에서는 비록 그 경계면은 반사법 탐사에 비해 뚜렷하게 나타나지 않으나 레이더 전파 속도 또는 감쇠율 등으로 구성 물질의 물성을 추정할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그림 7은 두 종류의 탐사를 동일한 시추공에



(a) 시추공 레이더 반사법 탐사 영상



(b) 시추공 레이더 토모그래피 영상

그림 7. 폐갱도를 탐지하기 위한 시추공 레이더 탐사 영상. 동일한 폐갱도를 탐사한 것이며 (a)의 반사법 탐사결과는 토모그래피 영상의 좌측 시추공에서 수행한 것이다.

적용한 사례로써 석회암 공동이 아니라 석회암 내부에 존재하는 약 2m 정도의 크기를 가지는 폐갱도를 대상으로한 탐사결과의 예이다. 반사법 영상에서는 거의 정확하게 폐갱도를 재현되어 있으나 고립 물체가 존재한다는 것만을 알 수 있을 뿐 그 물체의 물성에 대한 정보는 얻을 수 없다. 이에 반해 토모그래피 영상에서는 고립물체의 경계가 불명확하고 영상에서 추정할 수 있는 갱도의 크기는 반사법 영상보다 부정확하나, 주변의 레이다파의 전파 속도보다 훨씬 높은 고속도 이상대로 구현되어 있으므로 고립물체의 내부가 비어 있는 상태임을 추정할 수 있다. 이와 같이 두 종류의 시추공을 이용하는 레이다 탐사는 서로 보완 관계가 있으므로, 시추공 레이다 탐사를 수행할 경우 두 종류의 탐사를 병행함이 바람직하다.

위 폐갱도 사례와 같이 인공적으로 축조된 공동은 레이다 반사법 탐사에서 이상적인 점반사원으로 작용하여 점의 형태로 영상화 된다. 그러나 일반적인 석회암 공동은 그 반사면이 불규칙하므로 터널과 같이 뚜렷한 점 반사원의 반응을 보이지 않는 경우가 많다. 뿐만 아니라 지표수의 유입에 의하여 형성된 석회암 공동은 수직으로 어느 정도의 연장성을 가지면서 불규칙한 형태인 것이 보통이다. 그러므로 파쇄대

등과 석회암 공동을 반사법 탐사 영상만으로 구별하기란 쉽지 않으며, 수조의 파쇄대가 교차하는 경우를 공동으로 잘못 해석한 사례도 있다. 그러나 공동이 아닌 반사체 즉 파쇄대나 암맥 등은 비교적 연속적이며 직선의 형태로 레이다 반사 영상에 구현될 가능성이 높은 반면에 공동은 불규칙적이며 비연속적인 형태로 나타날 가능성이 높다. 또한 공동을 채우는 충전 물질, 즉 공기, 물 또는 점토의 전기적 물성인 유전율과 전기전도도는 모암인 석회암과는 매우 차이가 크기 때문에 공동이 아닌 파쇄대나 암맥 등과 비교해 볼 때에 공동은 매우 강한 반사원으로 작용한다. 그러므로 시추공 반사법 탐사 영상에서 석회암 공동을 해석할 수 있는 기준은 바로 불규칙적이며 비연속적으로 나타나는 매우 강한 반사 이벤트가 될 것이다. 그림 8은 국내 석회암 지역에 대형 구조물 건설을 위하여 획득한 시추공 레이다 반사법 영상이며 이와 같은 추론의 예를 실제적으로 잘 보여주고 있다. 즉 영상에는 각종의 반사 이벤트가 기록되어 있으나 타원 안에는 반사 에너지에 비해서 연속성이 약한 매우 강한 반사파가, 타원 밖에는 상대적으로 반사 에너지가 미약하나 거의 직선으로 발달하는 반사파가 기록되어 있다. 바로 타원 내부의 반사 이벤트가 바로 두 조의 석회암 공동에 대응되는 영상이며 타원 외부의 반사파는 파쇄대에 의한 반사 영상이다.

국내의 석회암은 괴상으로 산출되는 경우도 많으나 얇은 층리가 발달되어 있는 경우도 많다. 이러한 경우, 파동의 전파 방향에 따라 전파속도가 달라지는 이방성(anisotropy)이 나타나는데, 이는 전기적 성질이 -특히 유전율- 다른 물질이 박층을 이루며 교대로 나타나기 때문이다. 필자의 국내에서의 시추공 레이다 탐사 경험에 의하면 거의 절반 정도가 이방성이 나타나는 경우에 해당된다. 이때 이방성에 대한 고려 없이 토모그래피 영상을 구성한다면 지하의 정보는 완전히 사라지고 이방성 효과만이 영상화되므로 주의를 요한다.

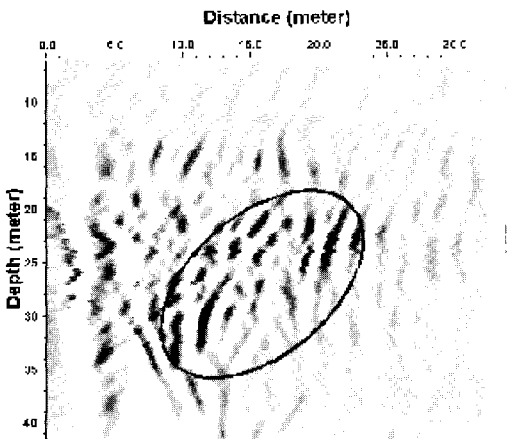


그림 8. 석회암 공동 탐사를 위한 시추공 레이다 반사법 탐사 영상 예

레이다 토모그래피 영상에서 석회암 공동은 그 내부를 채우는 충전 물질에 따라 고속도 이상대로도, 저속도 이상대로도 나타날 수 있다. 만약 공동이 비어 있다면 공기 중의 전자기파 전파속도가 가장 높으므로 고속도 이상대로 나타나며, 점토나 물로 충전되어 있다면 저속도 이상대로 나타날 것이다. 비록 공동은 고립된 이상체로 구현될 것이나, 실제적으로 토모그래피 영상만으로 공동을 구별함은 쉽지 않다.

그러나 만약 석회암이 이방성을 띠게 되면 우리는 또 다른 해석 기준을 가질 수 있다. 이방성 매질이 풍화, 변질 또는 파쇄가 진행되면, 이방성의 원인으로 들 수 있는 층리 또는 결정 축의 배열 등이 사라져서 이방성이 약해질 것으로 예상할 수 있다. 뿐만 아니

라 공동의 경우, 그 내부를 채우고 있는 물질인 공기, 물, 점토 등은 모두 등방성 물질이므로 이방성이 매우 미약하게 나타날 것이다. 그러므로 적절한 이방성 토모그래피 알고리즘을 이용하여 토모그래피 영상을 구현하고, 이방성 정도에 대한 정보까지 추출할 수 있다면, 이방성은 영상을 왜곡시키는 골치 아픈 현상이 아니라 오히려 지하에 대한 더 많은 정보를 얻을 수 있는 현상이 될 수 있다.

그림 9는 국내 고속도로 교량 건설을 위해 교각 하부 공동 탐사를 목적으로 수행한 레이다 토모그래피의 결과이며 이방성이 나타나는 것은 이 지역의 지질이 세립 판상 석회암으로 이루어져 있기 때문이다. 그림에 부가한 짧은 선분은 최고속도를 나타내는 전

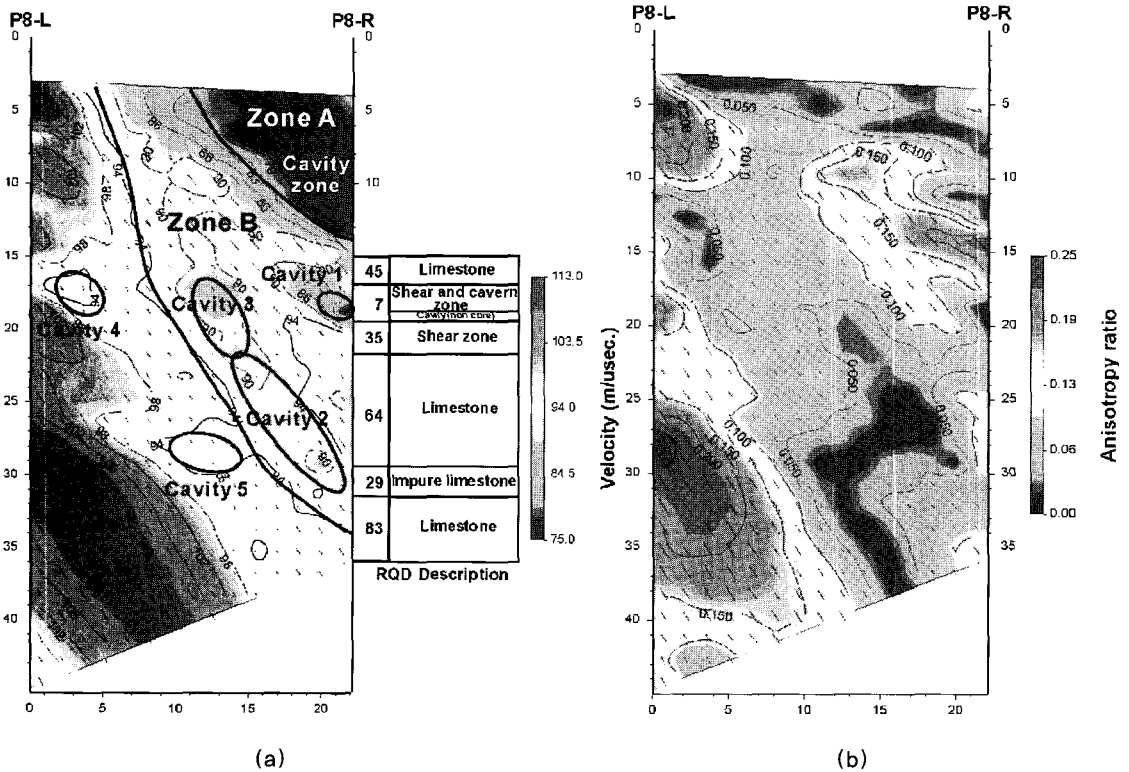


그림 9. 이방성 토모그래피 영상의 예.
 (a) 최고속도 토모그래피 영상. 전파 속도와 RQD 값의 분포 경향이 서로 잘 부합됨을 볼 수 있다. (b) 이방성의 정도를 영상으로 구현한 그림. 청색일수록 이방성 정도가 약하며 적색에 가까울수록 이방성이 강해짐을 뜻한다.

파 방향을 의미한다. 물론 최저속도를 이용하여 토모그래피 영상을 구현할 수도 있다. 영상에서 우측 시추공 P8-R은 총 6 회에 걸친 시도에 의하여 시추가 완료된 시추공이며 Zone A라고 표시한 부분은 시추 위치를 약간씩 변경하였음에도 불구하고 항상 공동을 만났던 구간에 해당된다. 이 외에 P8-R의 18~19 m 구간에서 공동이 착맥되었다. 공동이 확인된 이 두 부분은 그림 9 (b)에 구현되어 있는 바와 같이 모두 매우 미약한 이방성을 보이고 있으며, 따라서 위의 추론이 타당함을 알 수 있다. 그림 9 (a)에 해석한 공동은 이와 같은 이방성 정도, 전자기파 전파 속도 분포, 그리고 토모그래피 탐사와 병행한 시추공 레이더 반사 영상을 종합 해석한 결과이다.

6. 맺는 말

석회암 공동은 우리에게 신비한 아름다움을 제공하는 자연의 창조물이기도 하지만 지반 침하를 유발할 수 있는 재해의 원인 가운데 하나이기도 하다. 석회암 공동은 다른 지질구조와는 달리 대단히 불규칙한 형태로 발달하는 구조이므로 물리탐사의 대상 중

상당히 어려운 탐사 대상 중의 하나이다. 이 글에서는 공동에 의한 지반침하의 예방을 위하여, 그리고 지반침하의 원인을 규명하기 위하여 국내에서 수행하였던 탐사 결과를 이용하여 석회암 공동 탐지를 위한 물리탐사에 대하여 전기비저항 탐사, 레이더 탐사를 위주로 서술하였다. 그러나 이 글에서 논의하지 않았던 다른 탐사법, 예를 들면 중력탐사, 탄성과 굴절법, 반사법, 토모그래피 탐사 등 또한 유용한 방법이다. 여기서 우리가 생각하여야 할 것은 비록 물리탐사가 측선 하부 또는 조사지역 하부의 연속적인 영상을 보여줄 수 있는 훌륭한 방법이지만 하나 단순한 물성 분포의 영상에 불과하므로 최종 석회암 공동의 구별은 전적으로 해석자의 시각에 의존한다는 점이다. 그러므로 한가지 종류의 탐사법만을 적용하기 보다는 가능하면 여러 종류의 탐사법을 종합적으로 적용하여 각 탐사방법의 단점을 서로 보완하고, 나아가서 다양한 시각으로 탐사대상 지역을 조명할 수 있도록 하여야 한다. 위에 서술한 탐사 사례는 각각에 대하여 한 종류의 자료만을 예로 들어 서술하였으나, 사실은 지표 탐사와 시추공 탐사 뿐만 아니라 이 글에서 언급하지 않은 GPR 탐사 등을 종합적으로 적용하였던 결과이다.