

V. 석회암 공동지역에서의 물리탐사와 결과의 이용(1)

1. 개요

석회암 지대에서 발달하는 공동 탐지를 위한 물리탐사 방법으로는 전기비저항 탐사(지표, 시추공토모그래피), 탄성과 탐사(굴절법, 반사법, 시추공토모그래피), GPR 탐사(지표), 시추공 레이더 탐사(반사법, 토모그래피) 등이 활용될 수 있다.

국내에서는 지질 및 지형조건 등에 의해 지표 탐사로는 전기비저항 및 GPR 탐사가 널리 활용되고 있다. 그러나 지표 전기비저항 탐사는 탐사 원리상 분해능의 한계 때문에 고립된 공동을 직접적으로 탐지하기는 매우 어렵다. 그러나, 광범위한 지역에서 개략조사를 수행하여 공동분포현황을 파악할수 있는 물리탐사방법으로는 지표 전기비저항탐사가 가장 효율적이라고 할수있다. 지표 전기비저항 탐사에 의한 석회 공동탐지는 공동이 파쇄대 등의 지하수 유동 경로를 따라 발달되는 경우가 많으므로 파쇄대를 탐지함으로써, 기존의 정보와 종합해석하여 공동의 분포를 파악하는 접근 방법을 취한다. GPR 탐사의 경우에는 전기비저항 탐사보다 분해능이 높아 공동에 대한 영상을 직접적으로 획득할 수 있지만, 표토층이 전기전도도가 높으므로, 극히 천부에 위치하는 경우

*1 정희원, 한국자원연구소 책임연구원

*2 정희원, (주)희송지오텍 대표이사

*3 한국자원연구소 책임연구원

를 제외하고 기반암 내부에 위치하는 공동을 탐지하기는 매우 어렵다.

시추공을 이용하여 석회 공동을 탐지할 수 있는 방법으로는 탄성과 토모그래피탐사, 전기비저항 토모그래피탐사, 시추공 레이더(반사법, 토모그래피)탐사를 들 수 있다. 일반적으로 정량적인 지반정보 제공 측면에서 탄성과 속도분포를 제공하는 탄성과 토모그래피탐사를 주로 사용하고 있다. 그러나 탄성과 토모그래피 및 전기비저항 토모그래피는 공동에서 직접 반사된 파를 이용하는 것이 아니라 시추공 사이를 투과한 에너지를 이용하여 지하를 영상화하므로 기대한 만큼의 고분해능 영상을 획득하기가 쉽지 않다. 공동탐지 측면에서 고 분해능 영상(공동탐지 분해능)을 얻기 위해서 고주파수(수십 MHz)의 전자파 펄스를 이용하는 시추공 레이더 탐사가 사용되고 있다.

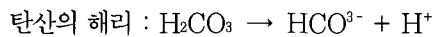
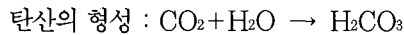
2. 공동의 형성 및 함몰

석회암 지대에 건설되는 철도, 터널 및 교량 등 대형 구조물의 설계 및 시공에 있어서 석회 공동은 구조물의 안정성 확보에 중요한 인자의 하나이며, 이들에 대한 보다 정밀하고 효율적인 지반조사 방법이 요구되고 있다. 석회암 지대 내부에 발달하는 공동 탐지를 위해서는 먼저 그 지역의 지질특성 및 석회공동에 대한 충분한 이해가 필요하다.

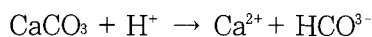
국내의 석회암은 하부 고생대층의 조선누층군의 소위 '대석회암통'의 석회암류가 주를 이루며 국부

적으로 선캠브리아기 및 상부 고생대 층내에서 일부 석회암층이 분포한다(Lee, 1988). 대석회암통의 석회암층은 옥천대내의 북동부 지역에 넓게 분포하며, 대표적인 분포지역은 동쪽에서부터 삼척, 태백, 정선, 영월, 제천, 단양, 문경과 청원, 보은, 옥천, 금산, 논산의 일부지역에 분포한다.

석회암 지대에서 흔히 관찰되는 카르스트 지형 및 석회 공동은 암반내의 지하수 유동에 의하여 지하수의 탄산과 석회암의 주 구성광물인 방해석이 아래와 같이 반응하여 방해석이 용해되므로써 형성된다.



방해석의 용해 :



이를 종합하면 아래와 같다.

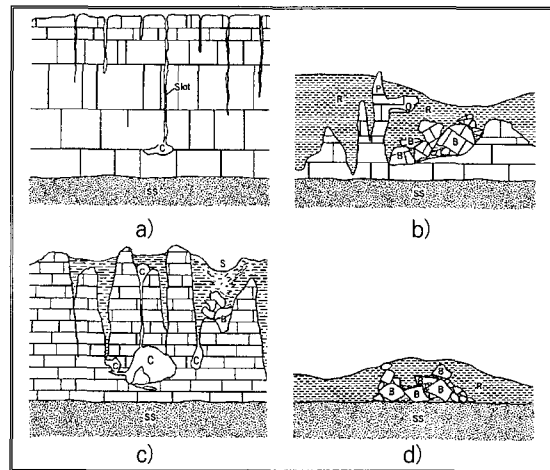


이러한 지하수의 유동은 암반 내 발달하고 있는 불연속면을 주요 통로로 하고 있으며, 따라서 대부분의 석회 공동은 주변의 주요 단층 및 절리의 분포 특성과 암석의 화학적 특성에 영향을 받는다. 석회 공동은 단층 등과 같은 불연속면의 틈새를 통해 주변의 석회암을 용해시키며 틈새를 확장하고 지속적으로 지하로 침투하여 부분 암질의 변화 또는 기타 불연속면의 교차 등 특정한 부분에서 석회암을 확대 용해시켜 형성되며 계속적인 용해 및 풍화에 의해 최종적으로 붕괴되는 과정을 겪는다. 이렇게 형성된 공동의 연장은 호층 석회암의 층리 또는 주 구조선 및 교차선을 따라 진행하면서 발달상태에 따라 주변의 공동과 수로로 연결된다(그림 1).

또한 형성된 공동을 통하여 흐르는 지하수로 인해 빈 공간으로 존재하거나, 다시 침전 또는 퇴적되어 충전된 공동 등이 존재하며, 대부분의 경우 공동의 상부의 빈 공간과 중하부 충전대 하부 및 주변의 풍화토(residual soil) 대로 구분된다. 따라서 지하의 석회 공동은 연약한 층리와 주요 불연속면의 교차지

점에서 발달할 가능성이 높으며, 이러한 공동 분포 가능성이 있는 교차 지점은 기 형성된 공동의 발달 특성을 조사 분석하고, 주변의 석회암 층리 및 주요 불연속면을 정밀 조사하여 예측할 수 있다.

이와 같이 생성된 석회 공동의 천반 주변에는 그림 2에서와 같이 수직압축력과 수평압축력이 발생하게 되며, 이들에 의해 야기되는 휨 모멘트의 영향으로 천반이 붕락하게 된다. 이러한 천반의 붕락은 점차 상부지반으로 확대되면서 지반침하 또는 지표함몰 현상이 발생하게 된다. 그러므로 이러한 지반에 건설되는 대형 구조물은 지반상태를 악화시키는 요인



a) → b) → c) → d)

C : 공동(cavity), S : 함몰대(sink hole),
SS : 사암(sandstone), B : 암괴(block), R : 잔류토(residual soil)

그림 1. 석회 공동의 형성 및 붕괴 과정(Goodman, 1993)

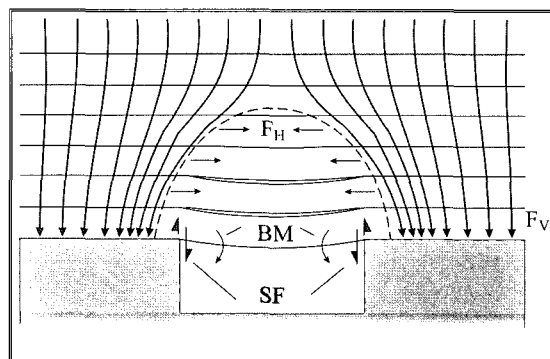


그림 2. 공동 주변의 응력분포도

으로 작용할 수 있으며, 건설 후 안정성에도 큰 문제점이 제기될 수 있으므로 설계단계에서부터 조사를 충분히 수행하여야 하며 시공중에도 정밀조사 → 보강 → 확인조사가 필수적으로 요구된다.

3. 공동탐지를 위한 물리탐사 방법

3.1 전기비저항 탐사

전기 비저항 탐사법은 1910년대에 최초로 제안된 이래 가장 널리 사용되는 물리탐사 기술의 하나로 광범위한 분야의 조사에 널리 사용되어 왔다. 최근들어 전자 및 소프트웨어 기술의 발달에 힘입어 지하 구조를 영상화하는 것으로 확대, 발전되면서 지하수 및 토목/환경분야에 많은 적용이 시도되고 있다. 특히 전기 비저항 탐사법은 지하의 지하수 분포에 관한 수문 지질학적 구조(hydro-geological structure)를 가장 효과적으로 탐지해 낼 수 있다는 강점으로 인하여 점차 토목분야에의 적용이 확대되고 있다. 즉 토목공사에서 가장 큰 문제점 중의 하나인 단층, 파쇄대 및 각종 연약대(공동 등)는 대개 지하수로 채워져 있으며, 이 지하수의 분포 및 이와 관련된 구조를 파악하는 것이 설계 및 시공에 매우 중요한 부분을 차지하기 때문이다. 국내에서는 외국에 비하여 대지의 전기 비저항이 높아 양질의 자료획득이 가능하다는 점 또한 전기 비저항 탐사의 적용분야를 더욱 확대

시키는 큰 요인이 되고 있다.

그림 3의 (a)와 같이 전기 비저항이 균일한 지하매질에 전류전극 C_1 과 C_2 를 통해 일정한 전류를 흘려주면 이 전류는 그림과 같이 전류 경로(path)를 통해 C_1 에서 C_2 로 흘러간다. 이때 이 전류 경로에 수직하게 같은 값의 전위를 갖는 등전위선이 형성되는데 이 등전위선은 지면까지 이어지게 된다. 지표의 전위전극 P_1 과 P_2 사이에 전위계를 설치하여 두 전극사이의 전위차를 측정한다. 전류전극과 전위전극의 위치, 흘려준 전류량과 측정된 전위차를 이용하면 균질한 지하 매질의 정확한 참 비저항 값을 알 수 있게 된다. 그러나 그림 3의 (b)와 같이 전기 비저항은 이상체가 지하에 존재하게 되면 전류는 전기 비저항이 낮은 물질 쪽으로 더 많이 흐르게 되어 결국 전류 경로에 수직인 등전위선에 변형을 일으키고 지표면에서 측정되는 전위차에도 영향을 미치게 된다. 이로부터 지표면에서 측정된 전위차를 이용하여 지하매질의 전기적인 이상체에 관한 정보를 가지고 있는 겉보기 비저항을 얻을 수 있다. 전기 비저항 탐사는 지하에 일정한 전류를 흘려보낸 후, 전위차를 측정하여 겉보기 비저항을 구하고 이를 해석하여 지하의 지질구조, 파쇄대나 균열대, 지하수 등의 분포를 파악하는 탐사방법이다.

전기 비저항 탐사는 석회암내의 지질구조, 파쇄대 등의 분포에 대한 영상을 획득함으로써, 공동이 발달

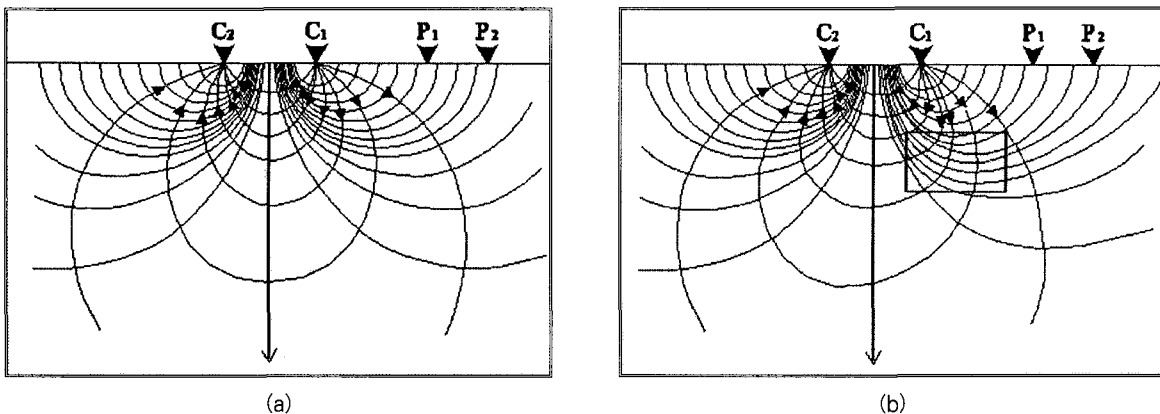


그림 3. 전류 및 등전위선 분포. (b)의 사각형으로 표시된 영역에서 저비저항 물체에 의한 왜곡이 나타나고 있다.

할 수 있는 지역을 파악하는 일종의 간접적인 탐사방법이라 할 수 있다. 그러나, 공동이 충분히 천부에 위치할 경우, 공동 그 자체를 영상화할 수도 있다. 이 경우 전기 비저항 영상에 나타나는 이상대는 공동이 점토 등으로 충전되어 있는가에 따라 고비저항과 저비저항이 모두 가능하다. 그러나 공동이 비어있는 경우는 고비저항인 기반암내에 또 다른 고비저항으로 나타나므로 판별이 쉽지 않다. 다음에 기술하는 사례는 대부분 공동이 점토 등으로 충전되어 저비저항 이상으로 영상화된 경우이다.

그림 4는 경북 문경의 고속도로 건설 구간중 교량 건설 예정부지 주위에서 발견된 석회암 용식공동의 발달 상태를 규명하고 또한 교량기초 하부의 암반 상태를 규명하기 위해 전극 간격을 20m로 하여 460m 축선에 대해 쌍극자 배열 전기비저항 탐사를 수행하고 탐사자료를 해석한 결과이다. 그림 4를 보면 STA.4km+220m 하부에 저비저항 이상대가 나타나고 있다. 이 지역에 대한 시추결과 BB-66에서 GL-26m와 GL-32m 하부에서 충식공동이 인지되었으며 이는 석회암지역에서 많이 발견되는 공동으로 지하수 유동에 의한 것으로 판단된다. 이 지역의 지하수위가 GL-32m로 일반적으로 석회암 지대에서의 공동의 분포양상이 지하수면을 따라 수평적으로 분포한다는 사실과도 잘 부합된다. 또한, 전기비저항 탐사결과를 통해 노선 전반에 걸쳐 천부에 충전

/풍화에 의한 저비저항 이상대가 발달하고 있으며 GL-20~30m 심도에 신선한 기반암이 분포하고 있다는 사실을 알 수 있다.

전기비저항 탐사 자료에서의 공동의 탐지는 그림 4에서와 같이 저비저항 이상대로부터 찾을 수도 있지만, 일반적으로는 고비저항과 저비저항의 경계부에서 많이 나타난다. 이는 고비저항과 저비저항의 경계부에서 단층 및 파쇄대가 많이 발달하고 또한 이 경계면이 지하수의 유동 경로가 되어 지하수면을 중심으로 공동이 발달하기 때문이다.

그림 5는 충북 제천의 고속도로 건설구간 중 교량 기초 하부의 전기비저항탐사 결과를 종합적으로 관찰하기 위하여 각 축선에 대한 2차원 전기비저항 구조 영상을 각 축선의 상대적인 위치에 따라 함께 나타낸 것이다. 신선한 암반 위의 녹색으로 나타나는 부분은 토양층이 아니라 석회암의 풍화 또는 변질대가 주를 이루며 따라서 연약 지반의 발달 상황을 의미한다. 그 내부에는 파쇄 및 변질이 심하게 진척되어 지하수의 좋은 유동 경로가 되어 공동의 발달 가능성이 높다. 특히 타원으로 표시한 부분은 대단히 낮은 비저항이 고립되어 발달하는 부분으로 공동의 발달 가능성이 대단히 높은 부분을 뜻한다.

그림에서 보면 교각 5번과 6번 사이, 그리고 8번 하부는 저비저항대가 매우 깊게 발달하며, 다른 교각 부위 보다 공동의 발달뿐만 아니라, 연약대의 발달이

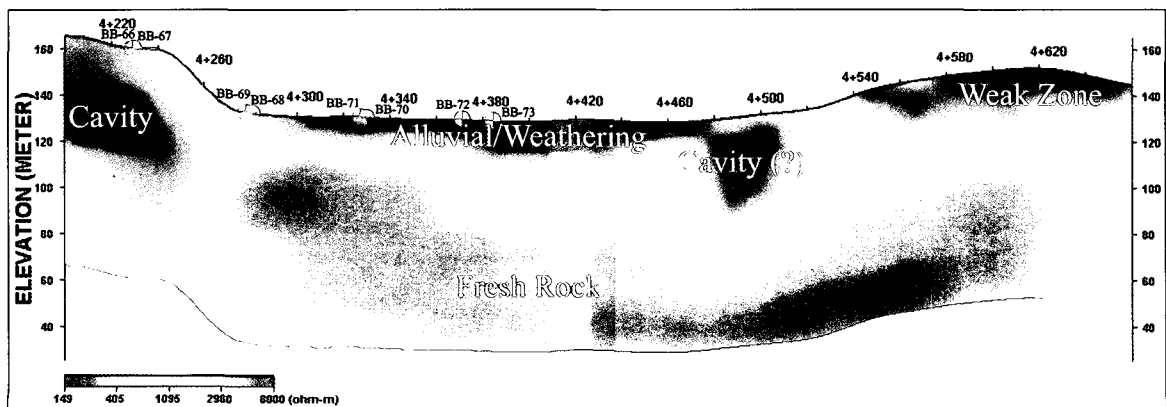


그림 4. 교량건설 예정부지에 대한 쌍극자 배열 전기비저항탐사 해석결과

심부까지 연장됨을 뜻한다. 한편 2번과 3번 하부에 또한 연약대가 수직적으로 발달하는 바, 이 부분은 교각 5번 서쪽 연변부에 출현하는 단층의 연장으로 해석되며 심부까지 연약대가 연장되어 있을 가능성이 매우 높다. 이와같은 사실은 교각 3번을 중심으로 한 부분은 바로 단층 연약대 직상부에 위치한다는 점을 시사하며 설계에 있어서 상당한 주의를 요한다.

교각 8번 연변부를 시작으로 교각 13번까지 연장되는 축선 PJ-2에서는 축선 PJ-1보다 녹색 계열의 연약대 발달 심도가 얕다. 이러한 사실은 교각 9번에서 13번으로 가면서 교각의 서측부가 동측부보다 연약대의 발달 심도가 얕다는 경향을 의미한다.

PJ-3의 축점 50번을 중심으로한 부분과 PJ-4의 축점 50번을 중심으로한 부분이 수직적으로 연약대가 발달하고 있다. 이는 상기한 PJ-1의 교각 5번과 6번 사이의 축점 260번을 중심으로 나타나는 수직 연약대의 연장을 의미하는 것으로 해석된다.

그림 6은 문경의 고속도로 건설 구간중 또다른 교량의 교각 및 교대 기초에 대한 전기비저항 탐사 결과를 도시한 것이다. 그림 6에서 작은 하얀색 원은 시추를 통해 확인된 공동의 위치를 나타낸 것이다. 먼저 교대 A1에서의 결과를 보면, 시추를 통해 확인된 공동의 위치가 고비저항으로 나타나는 신선한 암반과 저비저

항으로 대별되는 봉적층 등의 연약 암반의 경계부에 위치하고 있다. 이로부터 지하공동이 존재할 수 있는 지역은 신선한 기반암 주변에 폭넓게 발달하는 중간 비저항 지역으로 볼 수 있으며, 따라서 교대 A1 지역 및 교각 P3 지역의 하부에는 발견되지 않은 공동이 존재할 수도 있음을 알 수 있다. 또한 교각 P4 및 P5에서는 신선한 암반인 고비저항대와 교각축을 따르는 저비저항 이상대의 경계 부위에서 공동이 발견된 바 있으며, 이로부터 전체 공동 발달 구간을 해석함에 있어서 공동의 발달 가능성이 높은 지역은 이와 같이 신선한 암반과 연약 암반의 경계부위라 할 수 있다.

2차원 전기비저항 탐사는 지하 매질이 2차원 구조라는 가정하에서 역산을 하게 된다. 하지만 전위전극에서 측정되는 전위차의 값은 축선 직하부에 존재하는 비저항 이상대뿐만 아니라 축선 직하부 주위에 존재하는 비저항 이상대의 영향을 내포하게 된다. 따라서 지하매질이 2차원이 아닌 3차원 구조를 가질 경우 2차원 탐사를 통해 구한 해는 왜곡된 해가 된다. 지하매질이 복잡한 구조를 가질 경우에는 3차원 탐사를 통한 보다 정밀한 해석이 요구된다. 또한 3차원 탐사는 2차원 탐사와 달리 지하매질의 수직적인 전기비저항 분포뿐만 아니라 심도별 수평적 전기비저항 분포를 알 수 있는 장점이 있다.

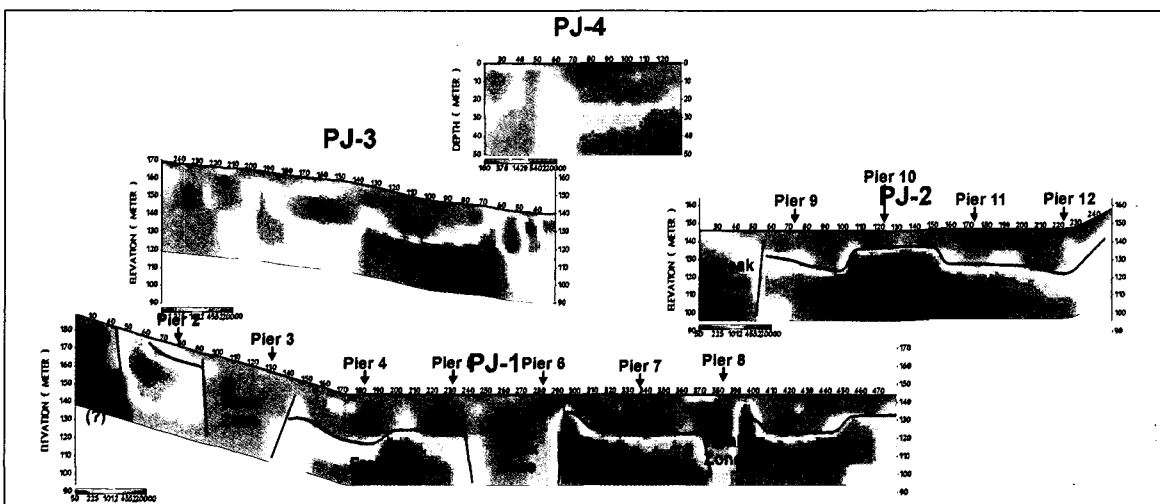


그림 5. 고속도로 교량기초 하부의 전기비저항 구조 및 해석결과

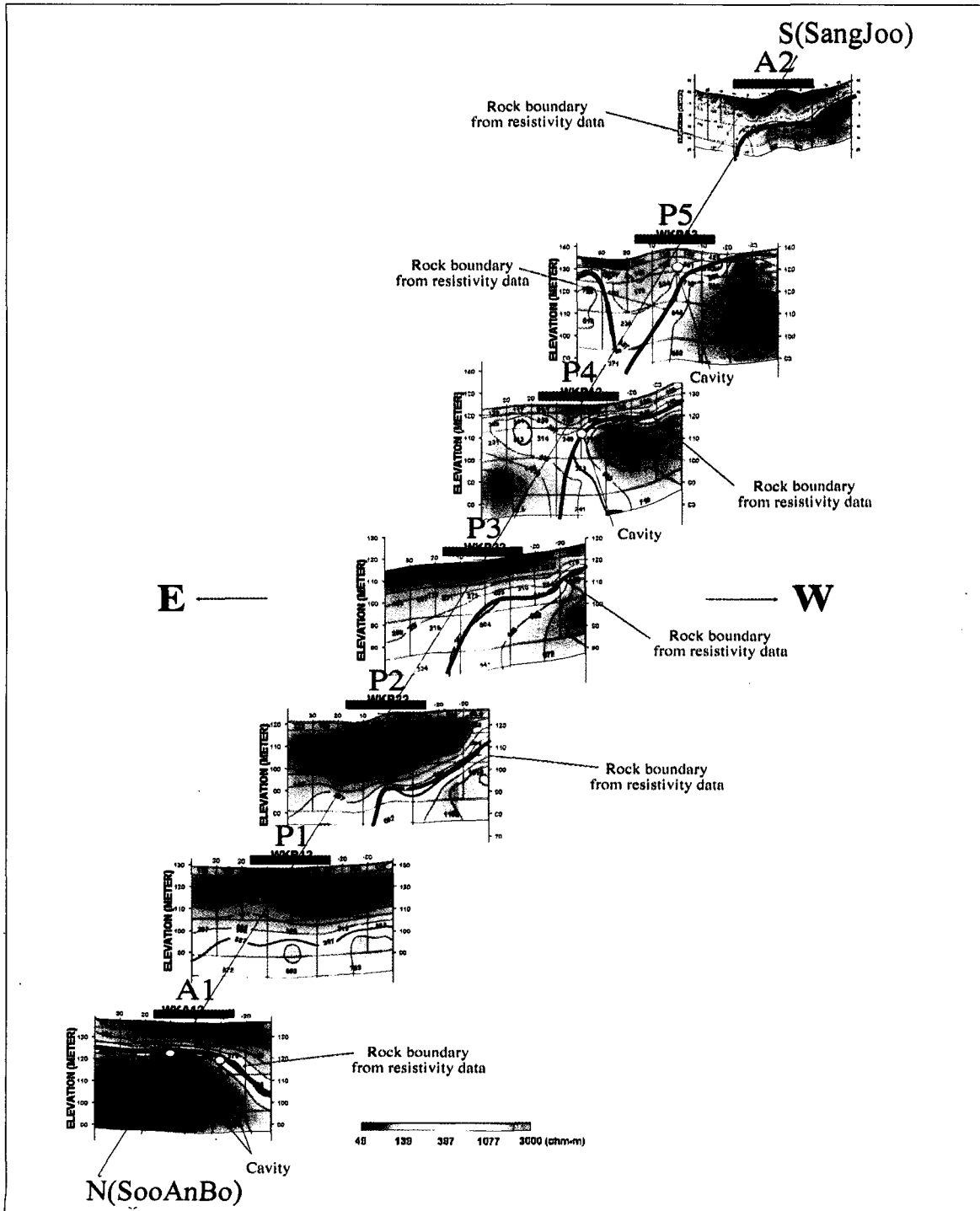


그림 6. 교량건설 예정부지의 교각 축을 따른 축선별 전기비저항 탐사 결과

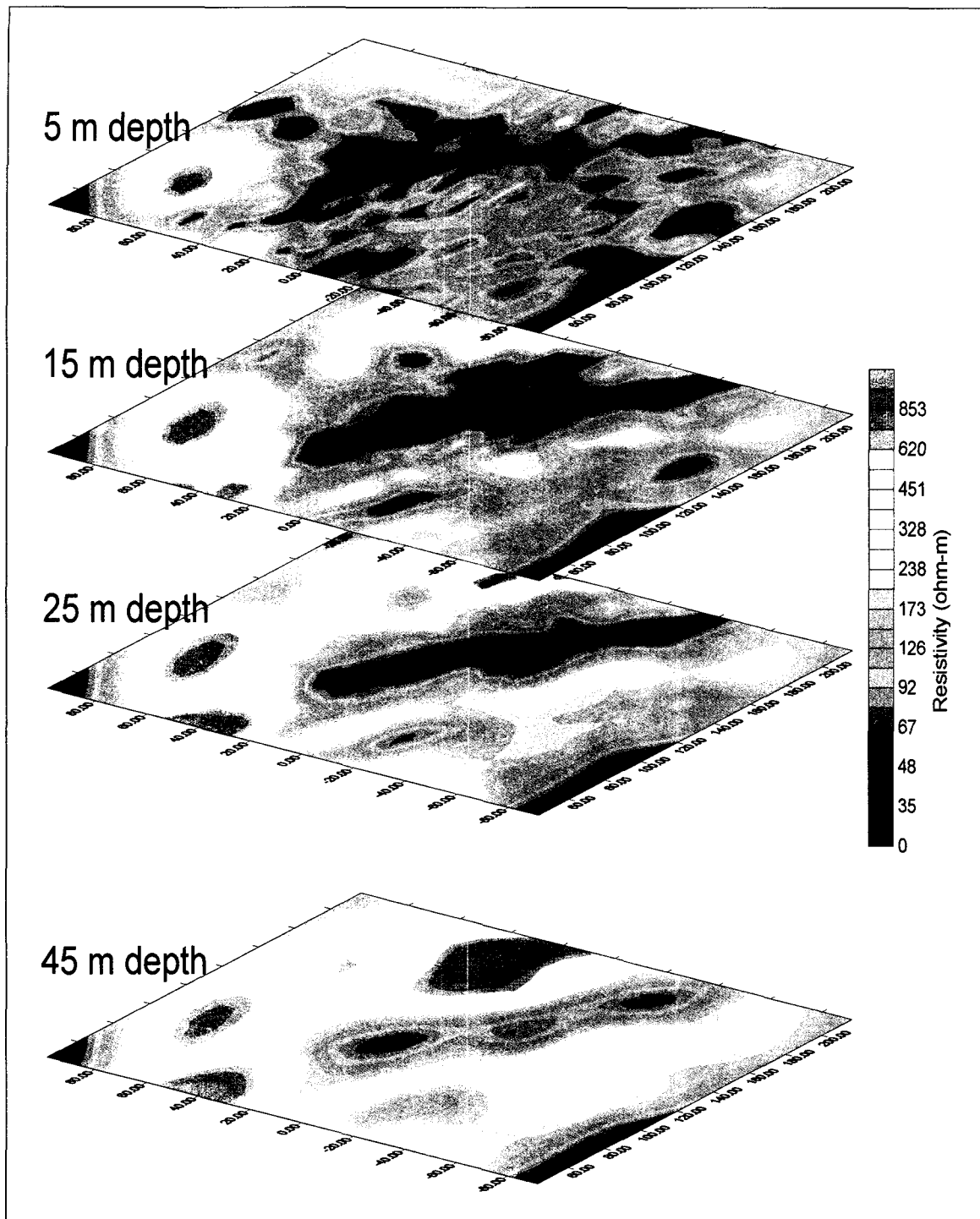


그림 7. 교량건설 예정부지에 대한 심도별 전기비저항 영상의 3 차원적 표현

그림 7은 3차원 탐사에 대한 예로 문경의 고속도로 건설 구간중 교량건설 예정부지에서의 3차원 전기비저항 탐사결과를 보여주고 있다. 그림 7을 보면 천부인 심도 5m에서의 전기비저항 분포도에는 전기비저항의 분포가 뚜렷한 공간적 경향을 보여주지 않는다. 그러나 그 하부의 전기비저항 분포 영상에는 대각선 방향으로 발달하는 매우 뚜렷한 공간적인 분포 경향을 갖는 저비저항대가 계속적으로 나타나고 있다. 이 이상대는 심도 약 10m 정도에서 나타나기 시작하여 심부까지 연장되고 있음을 알 수 있다.

3.2. 지표 레이더 (GPR, Ground Penetrating Radar) 탐사

레이더 탐사는 현재 상업적으로 이용되는 물리탐사 기술 중 그 해상도가 가장 뛰어난 탐사 기술이며 국내에서도 최근에 매설물 탐지나 지반조사 분야에서 지하 천부 정밀 영상화를 위해 주로 사용되고 있다. 레이더 탐사는 매우 고주파수의(수십 MHz - 1 GHz) 전자기파를 이용하므로 큰 의미의 전자탐사에 속하나, 전자탐사가 일반적으로 지하의 전자기유도 현상에 근거하는데 반해, 레이더 탐사는 원리상 탄성과 탐사와 마찬가지로 파동의 전파, 반사 및 굴절 성질을 이용하므로 전자탐사와 구분하여 다루고 있다. 레이더 탐사는 송, 수신 안테나가 지표에 위치하느냐 아니면 시추공내에 위치하느냐에 따라 지표 레이더 (GPR) 탐사와 시추공 레이더 탐사로 구분되어 진다.

지표 레이더 탐사는 지표에 송, 수신기를 위치시키고, 지하의 불균질대에서 반사되어온 전자기파 혹은 레이더파를 이용하여 지하구조를 영상화하는 방법이다. GPR 탐사는 공동탐사를 위하여 적용될 수 있는 물리탐사 방법 중 직접적으로 공동을 영상화할 수 있는 방법이며, 가장 분해능이 높은 방법에 속한다. 그러나 대부분의 경우 지표가 표토층으로 피복되어 있으며 표토층은 기반암에 비하여 전기전도도가 높으므로 극히 하부에 위치하는 공동 탐사에는 적용이 어렵다는 문제가 있다. 지표의 전기전도도가 높아서 기반암내의 공동을 탐지할 수 없는 경우에는, 시추공에

서 GPR 탐사를 수행하는 시추공 레이더 반사법 탐사를 이용할 수 있다.

그림 8(a)는 GPR 탐사의 측정방법을 모식적으로 나타낸 것이다. 수신 안테나와 송신 안테나를 지표면 측선의 측정 시작점에 위치시키고 측정을 시작한다. 그 측정에서 측정이 완료되면, 미리 결정된 측정 간격만큼 측선상에서 이동시켜 측정을 수행한다. 이와같은 과정을 안테나 시스템이 측선의 종료지점에 도달할 때까지 반복 측정한다. 측정결과, 즉 수신 안테나에 감지된 레이더파 신호의 세기를 수평축이 측선상의 거리이며 수직축이 심도 또는 레이더파의 전파시간인 단면도상에 칼라 혹은 음영도로 나타냄으로써 지하 구조를 영상화한다. 그림 8(b)는 파쇄대와 같은 면반사대와 공동과 같은 점반사원이 존재할 때의 반사 영상을 모식적으로 나타낸 것이다. 회절파의 존재에 의해 지하공동에 대한 정보를 획득할 수 있다.

그림 9는 충북 제천지역에서 건설중인 교량의 교각 3번과 2번을 연결하는 측선상에서 수행된 GPR 탐사 영상이다. 일반적으로 GPR탐사의 가탐심도가 10m 내외이나 본 지역에서는 대단히 깊은 심도 약 30m 정도까지의 영상을 보여주고 있다. 이는 본 지점의 암반이 다른 교각에 비하여 신선할 뿐만 아니라

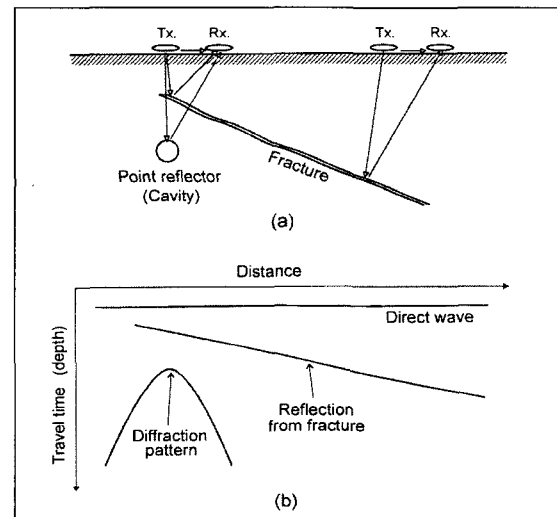


그림 8. (a) GPR 탐사의 원리, (b) 점 반사원 및 면 반사원 반사 영상 모식도

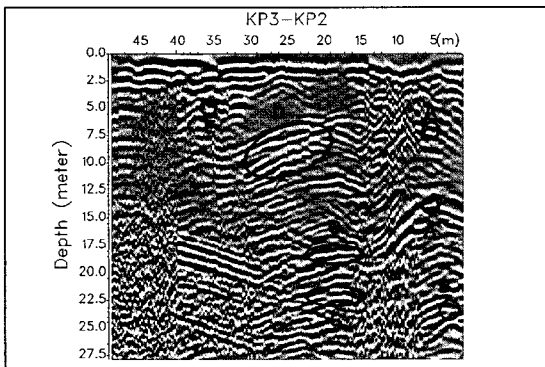
지표 부근까지 노출되어 레이다파가 거의 감쇄되지 않았기 때문이다. 영상에서 보면 상당히 많은 반사와 진폭 이상과 회절파가 관찰되고 있는데 측선 시작 부위인 측점 6m, 7m (이상대 A)에 회절파를 수반한 석회 공동의 반응이 나타난다. 또한 그 하부에 심도 14m 정도에서 또 다른 강한 회절파가 나타나는 바 (이상대 A'), 그 모양으로 보건대 이상대 A에 의한 다중반사에 지나지 않을 가능성이 높다. 또한 그 하부에 22m 부근의 심도에서 강한 회절파를 수반한 공동의 반응 B가 출현한다. 이들은 모두 강한 반사 진폭과 함께, 구조보정 이후에 석회 공동의 영상과 같은 점반사원 모양을 나타내는 것으로 보아 석회암 공동의 GPR 영상을 의미하는 것으로 해석된다.

측점 15에서 20m 하부 심도 18에서 22m 사이, 이상대 C, C'으로 표시한 강한 반사파가 나타나며 이 역시 석회 공동으로 보인다. 그 상부에 구조보정

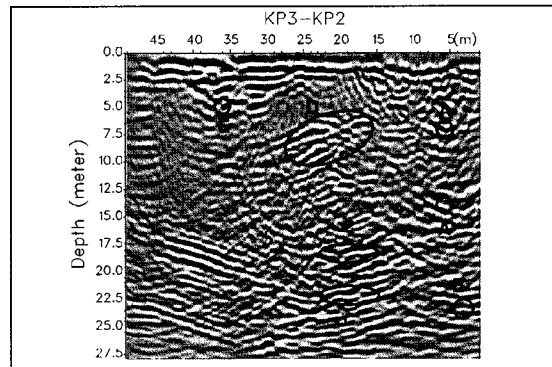
이전 영상, 측점 15에서 25m 구간, 심도 5에서 10m 사이의 넓은 범위에 걸쳐 수조의 뚜렷한 회절파가 발달하고 있다(이상대 D). 이들은 구조보정 이후에도 완벽한 형태를 보여주지 못하고 일부 회절파의 흔적이 남아 있다. 이들은 모두 석회공동의 영상으로 해석되며, 이와 같은 영상을 생성시키는 것은 공동의 상부를 비스듬하게 측선이 지나가는 것으로 해석된다. 그러므로 실체의 공동의 크기는 영상에서 보이는 것보다는 작을 것으로 판단된다.

이들 외에 측점 30에서 35m 구간, 심도 5m에 이상대 E로 표시한 회절파 형태가 나타나고 있다. 이 또한 석회 공동의 영상으로 해석되나, 만약 기반암이 5m보다 하부에 존재하고 있다면 이는 풍화대 내지는 토양 층 내에 고립된 전석일 가능성도 배제할 수 없다.

그림 10 및 그림 11은 그림 9와 동일한 지역의 또 다른 두 측선 KP3-1과 KP3-2의 두 측선에서 얻어

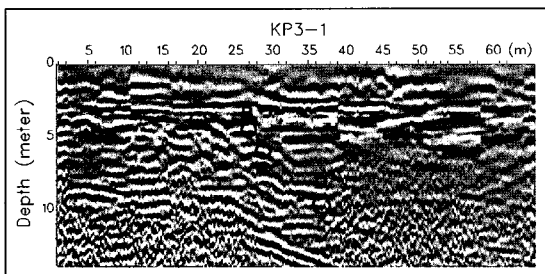


(a) 구조보정 이전 영상

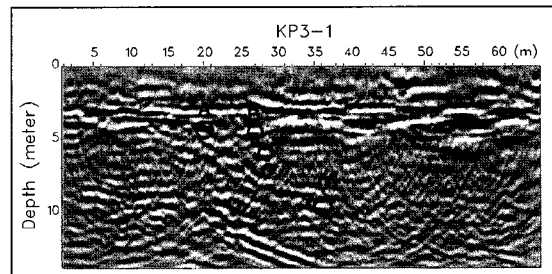


(b) 구조보정 이후 영상

그림 9. 교각 3번과 2번을 연결하는 측선(KP3-KP2) 상의 GPR 영상



(a) 구조보정 이전 영상



(b) 구조보정 이후 영상

그림 10. 3번 교각 측선 KP3-1 측선상의 GPR 영상

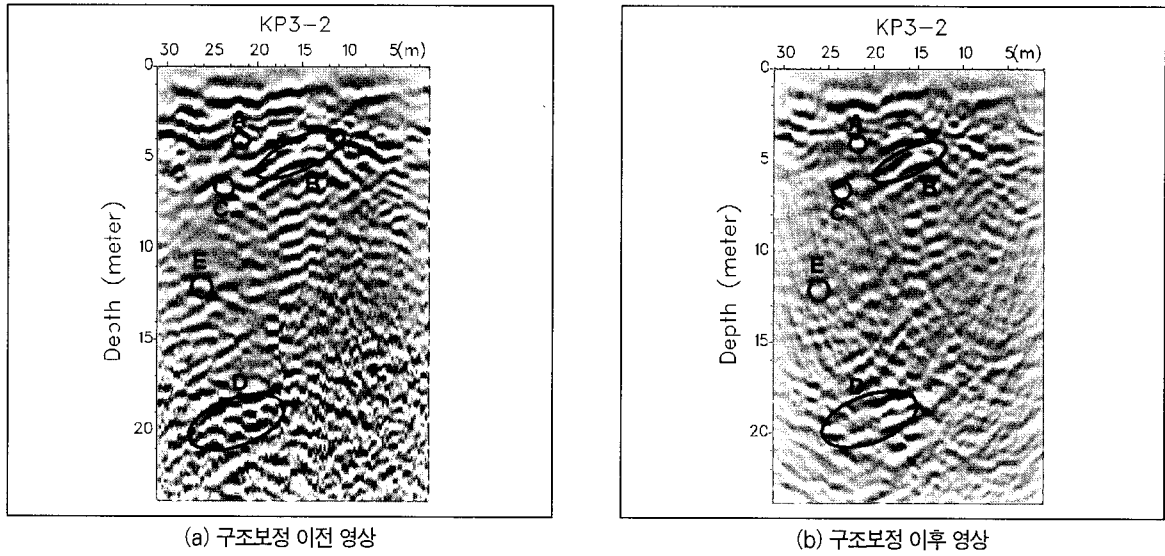


그림 11. 3번 교각 KP3-2 축선상의 GPR 영상

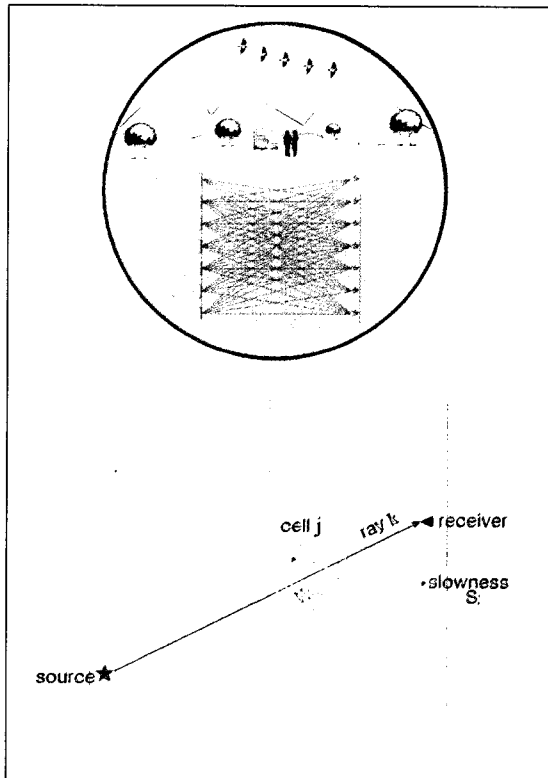


그림 12. 탄성파 토모그래피의 근본원리
 상 : 시추공 탄성파 토모그래피의 모식도
 하 : 주시역해의 근본원리

진 GPR 영상이다. KP3-1과 KP3-2는 위에서 언급한 KP3-KP2 축선의 영상보다는 영상에 나타나는 심도가 얕다. 그러나 두 영상에 모두 석회 공동의 징후를 보여주는 것으로 생각되는 부분이 나타난다. KP3-1의 축점 15에서 40m 사이, 심도 5에서 10m 구간에 A, B, C, D로 표시한 수조의 회절파 반응이 보인다. 이들은 모두 석회암 공동의 반응으로 보이며 서쪽에서 동쪽으로 가면서 깊어지는 경향을 갖는다.

축선 KP3-2의 영상에서는 축선 KP3-KP2보다는 얕으나, KP3-1보다는 상당한 깊이까지의 영상을 보여주고 있다. 본 축선에서도 석회 공동에서 반사된 것으로 판단될 수 있는 부분이 있으며, 그 중 뚜렷한 것들을 A, B, C, D, E로 영상에 표시하였다. 그 중 축점 10에서 25m 사이의 심도 5m 내외에서 출현하는 이상대 B 및 C는 KP3-1의 이상대 A, B, C와 그 심도 및 위치가 비슷한 것으로 보아서 동일한 석회 공동에 대한 영상으로 해석된다.

또한 KP3-2의 심도 18m에서 발달하는 이상대 D는 그 심도 및 형상이 축선 KP3-KP2의 이상대 C 또는 C' 과 유사하다. 이러한 점으로 볼 때에 석회 공동으로 해석되는 축선 KP3-KP2의 이상대 C는 북쪽으로 연장되어 축선 KP3-2의 이상대 C로 나타나

는 것으로 해석된다. 만약에 이들이 공동에 의한 영상이라면 추정될 수 있는 공동의 폭은 약 3~4m 정도일 것으로 판단된다.

3.3 탄성파 토모그래피 탐사

그림 12는 시추공 토모그래피탐사의 측정원리를 나타내고 있다. 한쪽 시추공에는 탄성파 발생원 장치를, 또 다른 시추공에는 수신기 장치를 설치한다. 여기서 탄성파 발생원은 시추공 내부에서 그 위치를 이동하면서(지반조사에서는 약 1m 간격) 탄성파를 생성한다. 각 발생원 위치에서 생성된 탄성파는 지하 사방으로 전달되고 그 중 일부는 또 다른 시추공에 설치된 각 수신기에 도달하게 된다. 발생원으로부터 하나의 수신기에 도달된 모든 종류의 탄성파를 담은 기록을 흔히 탄성파기록(seismic trace 혹은 trace)이라 한다.

그림 12의 아래 부분에는 두 개의 시추공 사이에서 발생원으로부터 수신기에 도달하는 탄성파를 파선(ray)으로 나타내고 있으며 또한 두 시추공사이의

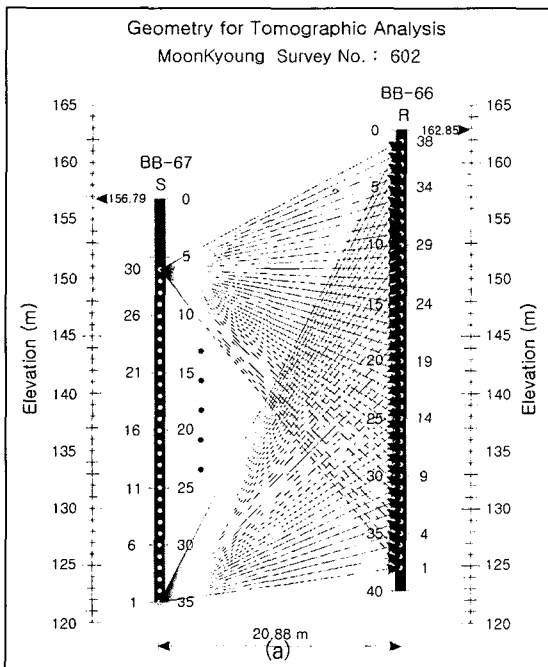


그림 13. 시추공 BB-67 ~ BB-66 단면측정 파선 진행도

매질을 편의상 이해를 돕기 위해 20개의 cell로 나누고 있다(실제 응용에서는 수백 수천개의 cell로 나눔). 여기서 각 cell의 매질은 균질하다고 가정한다. 발생원에서 생성된 P파는 각 cell을 통과하면서(그림 12에서는 6개의 cell 통과) 각 매질의 탄성에 따라(경암일 경우에는 짧은 주시시간, 풍화암일 경우에는 긴 주시시간 소요) 일정한 시간을 소요하게 되며 그 전체 주시시간은 trace에서 초동의 주시와 일치하게 될 것이다. 토모그래피 단면을 형성하는 cell의 수를 N개, 측정된 트레이스 수를 M개라고 하면, 측정된 초동주시로부터 N개의 미지수를 갖는 M개의 연립방정식을 얻는다. 이 방정식의 해를 구함으로써 단면상에서의 탄성파 속도분포를 얻게 되며, 이로부터 토모그램 및 지질구조 단면을 얻을 수 있다.

그림 13은 앞의 그림 4의 전기비저항 탐사 측선과 동일지역으로 용식동굴이 발견된 교량건설 예정부지 주위에 위치한 BB-67 ~ BB-66 단면에서의 파선진행도이다. 그림은 BB-67 ~ BB-66 단면에 대한 발생원-수진기 배열상태와 함께 탄성파 전달상태를 파선으로 도시한 것이다.

그림 14는 발생원이 비교적 천부인 26번 송신원에서의 공동 송신원 취합 결과로 P파 초동이 어렵게나마 인지할 수 있다.

그림 15는 대체로 양호한 P파 초동을 이용하여 역산된 탄성파 속도 분포(a)와 해석단면도(b)를 도시한 것이다. 그림 (a)를 보면 E.L. 130~135m 사이에서 석회 공동에 의해 초래될 수 있는 속도 이상대가 관찰되고 있다. 여기서 주시할 점은 측정된 석회

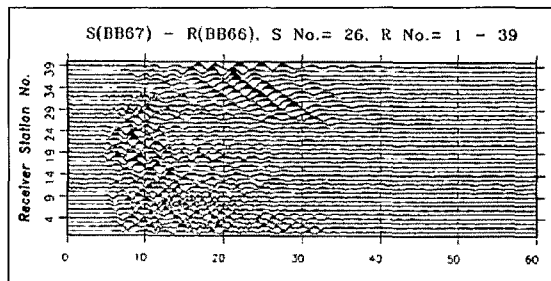


그림 14. 시추공 BB-67 ~ BB-66 단면 측정 결과 중 26번 송신원에서의 shot gather

공동의 직상부가 극경암에 준하는 균질한 탄성과 속도대를 형성하고 있다는 점이다. 즉, 공동이 상부로 연장되지 않음을 알 수 있다. 그림 (b)의 해석결과를 보면, 이 구간에서 지하수에 의한 공동이 발달하고 있음에도 탄성파의 속도가 매우 높게 나타나고 있다. 이는 이 구간에서의 공동의 발달이 아직은 초기 상태로 지하수에 의해 국부적으로 발달하고 있는 것을 암시하는 것으로 이는 시추 결과 거의 전 구간에서 경암이 나타나고 있다는 사실이 뒷받침하고 있다.

3.4. 시추공 레이더 탐사

시추공을 이용한 레이더탐사는 시추공 반사법 탐사와 시추공간 토모그래피 탐사로 구분된다. 그림 16에 이들 두 방법의 원리를 모식적으로 나타내었다. 레이더 토모그래피 탐사는 두 개의 시추공에 송·수신 안테나를 각각 삽입하여 지하의 불균질대를 통과하여 수신된 레이더 파를 이용하여 지하구조를 영상화하는 방법인데 반해, 시추공 반사법 탐사는 하나의 시추공

에 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 레이더 토모그래피 탐사는 두 시추공 사이의 암반의 연경도에 대한 영상을 잘 그려내 줄 수 있다는 장점을 갖고 있으며, 지하의 연약대 분포를 훌륭하게 영상화할 수 있다. 이와 같은 이유 때문에 시추공에서의 두 탐사 방법은 상호 보완적인 의미를 갖는다.

레이더 토모그래피 탐사는 고주파수 (수십 MHz)의 전자기파를 사용한다는 것을 제외하고는 탄성파 토모그래피와 거의 유사하다.

레이더 탐사는 전자파가 대상이므로 탐사의 기본이 되는 중요한 물성은 전기비저항 및 유전율이 된다. 지하내에서 전자파 펄스의 전파속도는 주로 유전율에 의

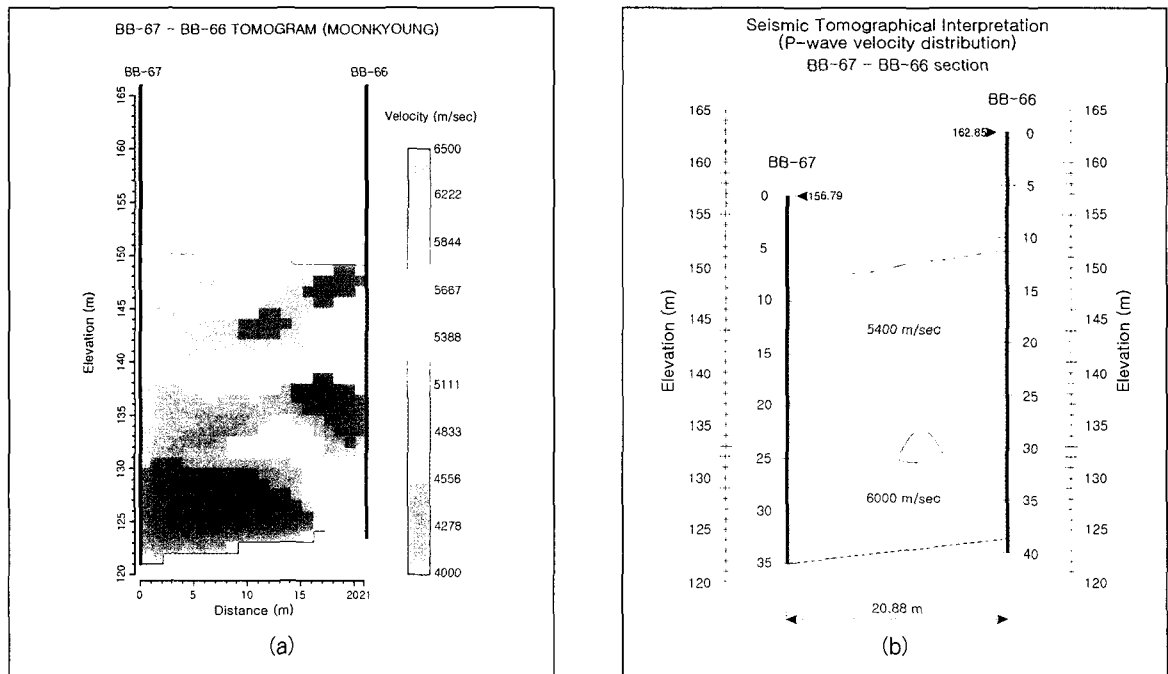


그림 15. 석회 공동지역 교량기초 하부 탄성파 토모그래피 탐사결과
BB-67 ~ BB-66 단면에 대한 탄성파 속도분포(a) 및 해석단면도(b)

존하며, 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 및 변질대 등은 거의 대부분 신선한 기반암에 비해서 수분의 함량이 상당히 높으며 점토광물이 수반되는 것이 보통이다. 화강암, 석회암 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 및 감쇠 토모그램 모두 암반의 신선도 또는 연약도를 영상화한 것으로 간주할 수 있다. 공동의 경우, 공동이 비어 있을 경우는 공기의 레이더 전파속도는 빛의 속도와 같으므로 도달주시 토모그래피 영상에서 고속도 이상대로 영상화되며, 물이나 점토로 충전되어 있을 경우에는 이들의 속도가 암반보다 느리므로 저속도 이상대로 영상화 된다.

레이더 토모그래피 탐사는 주로 암반 내에서 수행되기 때문에 물성의 차이가 크지 않으므로 측정되는 도달주시 또는 진폭 등은 그 값들의 대비가 크지 않다.

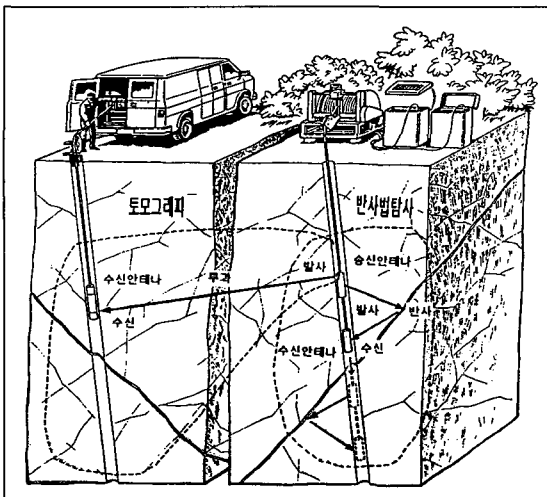


그림 16. 시추공 레이더 탐사 및 레이더 토모그래피 탐사의 모식도

그러므로 송·수신 시추공 간격이 클 경우에는 큰 문제가 없지만, 짧을 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.

그림 17은 전기 비저항 탐사사례 그림 5와 동일지역으로 교량기초 지반조사의 일환으로 시추공 레이더 토모그래피 탐사를 수행하여 얻은 해석의 예로서 교각 5 번과 교각 8 번의 레이더 토모그래피 영상에 공동 및 연약대 분포 해석 결과를 함께 나타낸 것이다. 시추공들 중에서 시추 자료가 존재하는 부분의 RQD 분포를 함께 도시하였다. 각 그림에서 추정 공동의 위치 등의 해석은 시추공 레이더 반사법 탐사 영상과 토모그래피 결과를 종합하고, 시추자료를 참고하여 작성된 것이다.

5 번 교각 하부 지반의 특징은 대규모 단층의 인접부에 위치하여 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 석회 공동 a와 b는 시추공 레이더 반사법 영상에서 나타난 이상대에 의하여 해석하였다.

그림의 두 교각하부 토모그램에 나타나는 공통적인 현상은 이들 두 교각의 우측부가 좌측부보다 방향성을 가지고 연약대가 깊이 발달하는 것으로 나타난다는 점이다. 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 연약암반과 비교적 신선한 암반과의 경계면을 따라서 지하수가 유동된 결과로 해석될 수 있다.

RQD 값과 각 시추공의 속도 분포의 대비에 대해

여 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.

3.5 텔레뷰어(Televiewer) 탐사

텔레뷰어는 초음파 빔(ultrasonic beam)을 이용하여 공벽을 스캐닝함으로써 공벽에 표출된 암반의 물성 및 절리 발달 상태를 규명할 수 있는 일종의 물리검층이다. 즉, 시추공 중심으로부터 공벽을 향하여 거의 수직적으로 초음파 빔을 방사하였을 경우 공벽에 의해 반사되어 다시 시추공 중심으로 되돌아 온 초음파 빔의 진폭과 주기는 텔레뷰어 측정의 핵심 데

이터이다 (그림 18). 여기서 진폭치는 공내 매질(물)과 공벽 암반과의 임피던스(밀도 × 탄성파속도) 대조 혹은 공벽의 반사계수 R(0~1)에 따라 달라지기 때문에 바로 암반의 물성과 직접적으로 연관된다. 만약, 초음파 빔이 공내 단열(혹은 절리)에 입사되면 산란현상에 의해 되돌아오는 초음파는 상당한 에너지를 잃게 되며 그로 인해 단열의 식별이 용이하게 된다. 한편, 반사파의 주기는 시추공 크기 및 공벽 상태를 파악할 수 있는 자료가 된다. 즉, 시추공 중심과 공벽간의 왕복주기는 이미 알려진 물의 탄성파속도(1500m/s)에 의해 그 거리(시추공 단면이 원형일 경우 반경에 해당)로 전환될 수 있기 때문에 그 결과는 바로 고분해능 공경 검층 결과가 된다. 따라서, 반사파 주기는 공벽의 거칠음, 공벽의 크기, 공벽의 원형 상태에 따른 응력분포 추정, 절리의 열린상태 등에 대한 정보를 나타내게 된다.

그림 19는 그림 4 및 그림 15와 동일지역에 위치한 시추공 BB-66에 대하여 텔레뷰어 탐사를 수행한 결과이다. 시추공 BB-66은 교량의 교대 위치에 해당하며 암반은 전 심도에서 경암으로 분류되고 있다. 본 시추공의 경우 지하수위가 대단히 낮은 심도 약 32m이며, 이는 시추공과 인접한 노두에서 관찰된 공동 위치와 거의 일치한다. 한편, 텔레뷰어 탐사를 가능하게 하기 위하여 시추공에 빠른 속도로 물을 주입한 결과, 심도 약 26m 주위에도 또 다른 유출로가

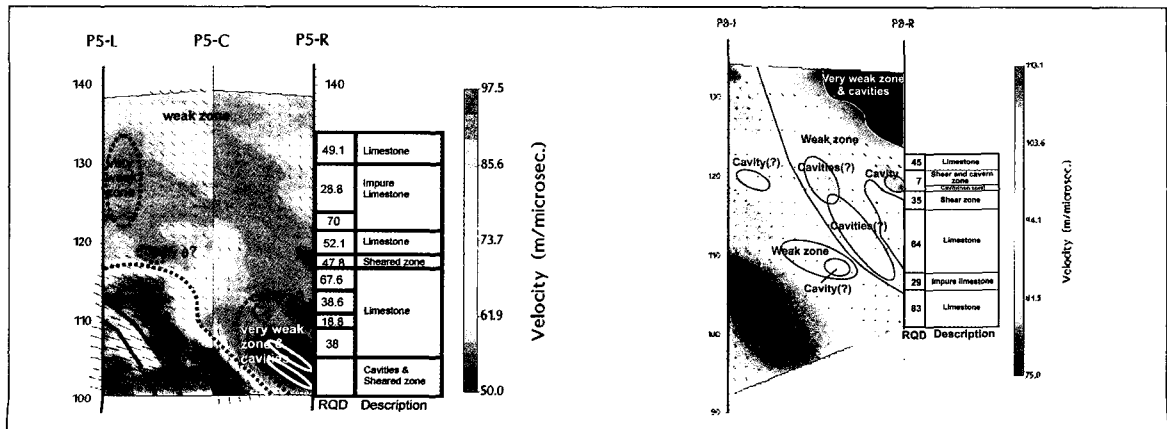


그림 17. 교각 5 번 및 8 번 하부 레이더 토모그래피 영상 및 연약대, 공동의 분포 해석 결과.

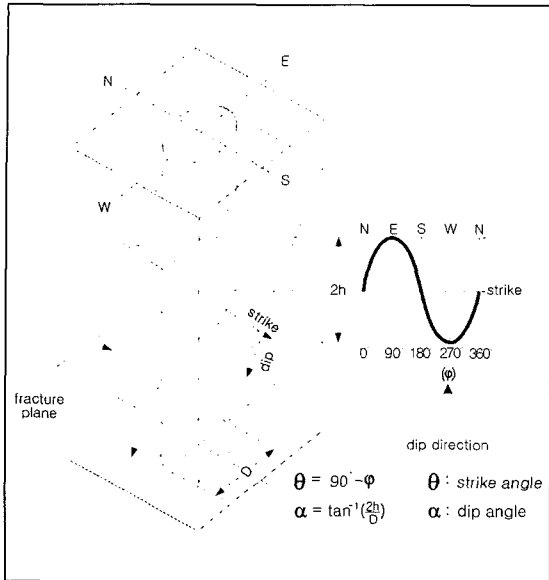


그림 18. 텔레뷰어의 근본원리
(입의 경사를 뒀 절리면이 시추공을 절단하면 시추공벽에 타원형의 절리흔적이 형성된다. 이러한 절리흔적은 텔레뷰어 측정에 의해 지자기 북극을 기준으로 하여 sine curve로 표현되며 그로부터 절리면의 주향 내지 경사가 결정된다.)

존재하고 있음이 인식되었다.

그림 19(a)는 심도구간 약 24.5~33.1m에 대한 텔레뷰어 영상으로 심도 약 26.3m 주위에서 공동의 징후가 관찰되었다. 또한 지하수와 관련된 심도 약 32m 주위에도 공동이 인식되고 있다. 이는 시추코아에서 확인된 충식공동으로 판단된다. 그림 19(b)와 (c)는 각각 심도구간 25.8~26.8m과 31.6~32.6m에 대한 확대된 영상 결과를 보여주고 있다.

그림 20(a)는 20~42m 심도구간에서 측정된 모든 절리들을 대상으로 전산처리한 결과를 보여주고 있다. 2개의 주된 절리군이 보이며, 경사방향은 각각 258°, 279°, 경사각은 각각 28°, 20°로 대체로 뚜렷한 경사방향과 완만한 경사각을 보여주고 있다.

그림 20(b)는 20~42m 심도구간에서 텔레뷰어 영상과 절리분석 결과에 의해 산출된 텔레뷰어 암석 강도 결과로 전체적으로 암반은 균등한 경암 수준을 보여주고 있으며, 공동이 발견된 심도 약 26m 지점과 32m 지점에서 강도가 낮게 나타나고 있다.

그림 21은 시추공 BB-67 ~ BB-66 수직단면에 대

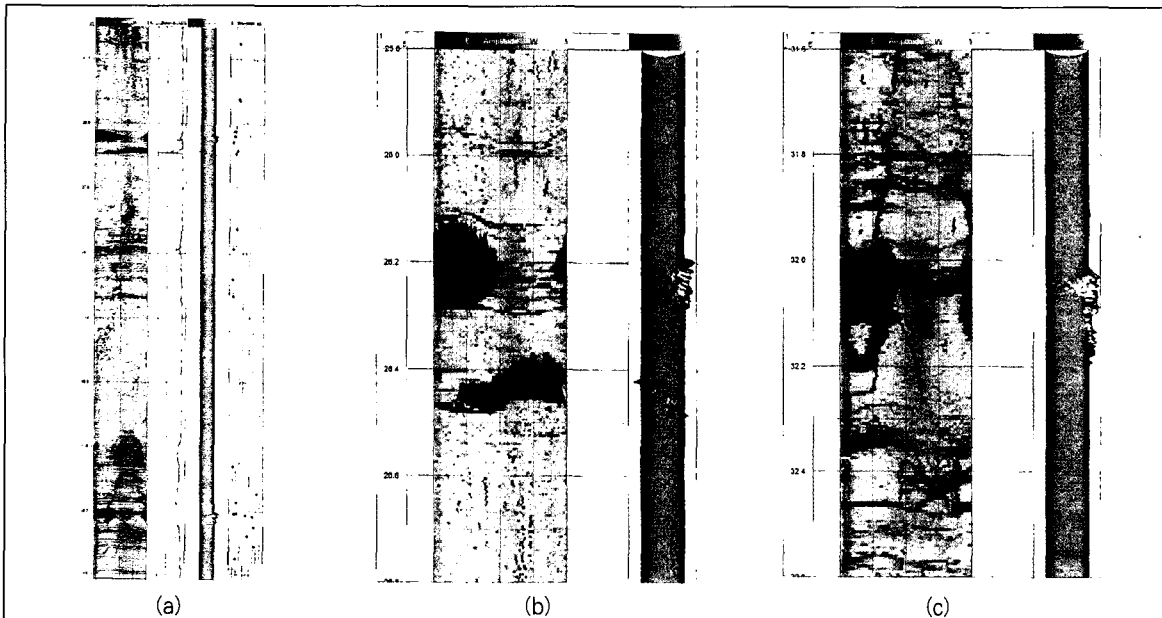


그림 19. 심도구간 24.5~33.1m에 대한 텔레뷰어 영상 결과(a) 및 심도구간 25.8~26.8m(b)과 심도구간 31.6~32.6m(c)에 대한 확대된 영상 결과

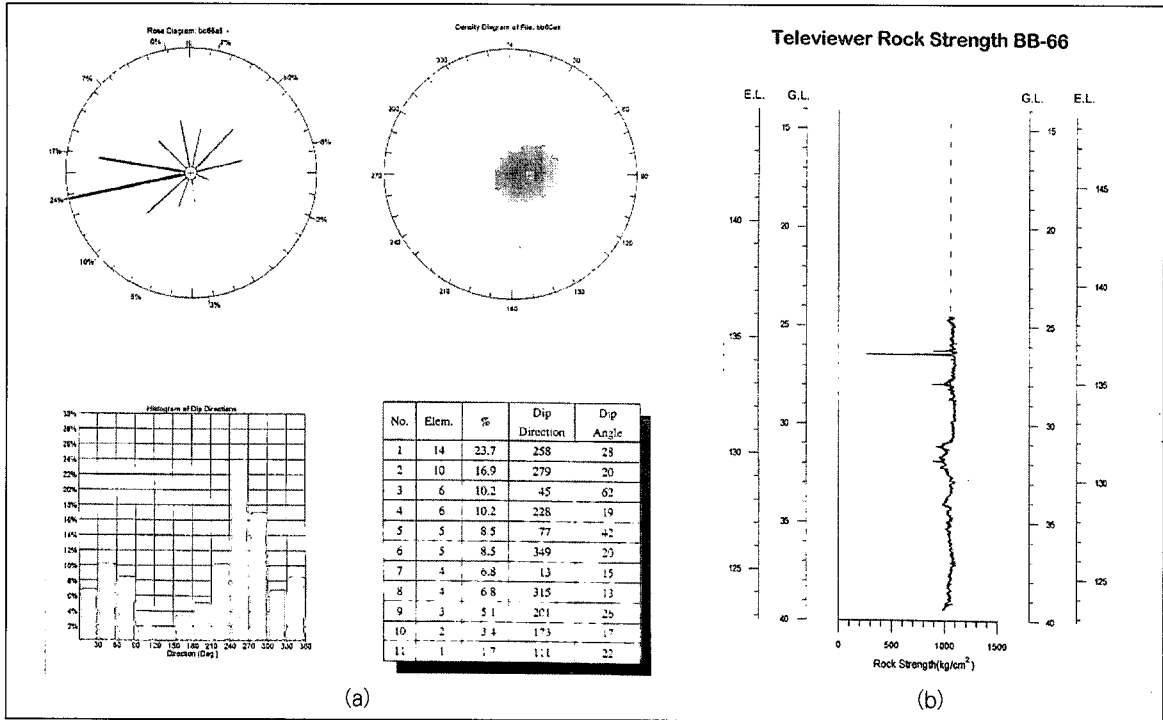


그림 20. 심도구간 20~42m에서 인식된 모든 불연속면에 대한 통계학적 분석 결과(a)와 텔레뷰어 영상과 절리분석 결과에 의해 산출된 텔레뷰어 암석 강도(b)

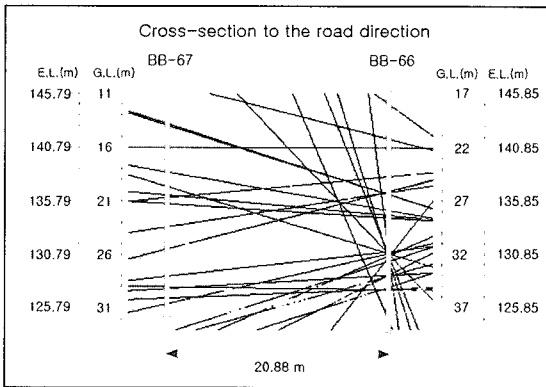


그림 21. 시추공 BB-67~BB-66 단면에 대한 face map.

한 절리연장 상태로 각각의 절리들이 뚜렷한 방향성과 완만한 경사각을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. 김기석, 최성용, 조두희(1999), "문경석회암 공동지역에서의 지반조사 사례", 한국지반공학회 '99 암반 역학위원회 세미나 논문집, pp.121-144.
2. 김정호, 조성준, 이명종, 송윤호, 정승환(1999), "시추공 레이더 탐사법을 이용한 석회암지대 공동조사", 한국지반공학회 '99 암반역학위원회 세미나 논문집, pp.93-118.
3. (주)대한콘설탄트(1998), "중부내륙 고속도로 건설공사 제8공구 토질조사 보고서(1)"
4. (주)희송지오테크(1998), "중부내륙 고속도로(수안보-상주간) 제9공구 석회암 공동분포 파악을 위한 전 기비저항 탐사 최종보고서"
5. Goodman, R.E. (1993), Engineering Geology, John Wiley & Sons, Inc, pp.143-194.
6. Lee, D.S.(1988), Geology of Korea, Geological Society of Korea, Kyohak-Sa, pp.49-81.