

토목설계 및 시공분야 지반조사를 위한 절리 단면 영상법 개발 및 그의 응용사례

Development of fracture face mapping algorithm and its applications to the design of various engineering and environmental works.

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김유성¹⁾, Yoo-Sung Kim, 김기석²⁾, Ki-Seog Kim

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

²⁾ (주)희송지오테크, Hee Song GeoTek Co., LTD.

SYNOPSIS : Fractures, especially faults have most significant influence on the difficulties encountered in various engineering and mining works, because they can give rise to inevitable reductions in shear strength as well as large increase in permeability. Thus, before underground access is possible, it is desirable to estimate the distribution and geometry of fractures in advance, if reliable structural data from e.g. Televiwer tool are available. To this end, fracture face mapping is just the evaluation method used to form a fracture image determined by intersecting of each fracture plane with a selected plane section of a rock mass, assuming that all fractures be planar with fixed-aperture. Although many fractures are geometrically complex and others are altered chemically, according to the abundant experiments in recent years, it would seem that the technique could be applied to benefit the design of numerous engineering works such as slope stability, tunnel excavations, dam foundation and diverse environmental works. This paper presents at first an evaluation algorithm for fracture face mapping and then concludes with various representative examples of applications.

Key words : fracture face mapping, Televiwer, slope stability, tunnel excavation, dam foundation

1. 서 론

암반내에 형성된 절리, 단층, 절리(bedding) 등(총칭하여 불연속면)의 연속성은 일반적으로 지질학적 성인에 따라 상당한 차이를 보여주고 있다. 대체로 퇴적암에서는 그들의 연장성이 비교적 유지되고 있으나 변성암일 경우에는 일찍 단절되는 사례도 허다하다. 불연속면 연장상태는 용질(예: 지하수, 방사능)의 투수성이나 암반의 전단강도와 직접적으로 연계되고 있기 때문에 특히 지하수 유동연구, 사면문제, 댐 기초, 터널굴착 작업 등에서는 사전 규명되어야 할 바람직한 기본자료이다. 지금까지 이러한 자료는 주로 노두에 표출된 불연속면의 발달상태(예: 연장길이, 틈새간격)를 관찰함으로써 정량화되고 있으나 여기에는 그나마 노두가 제한될 경우, 자료수집에도 상당한 어려움이 뒤따르고 있다. 최근, 국내에도 텔레뷰어 기법의 선진화(김중열 외, 1998 ; 김중열, 2000)로 인하여 지하 지질구조에 대한 보다 구체적이며 정량적인 연구가 활발히 진행되고 있다. 텔레뷰어는 초음파 발생원을 이용하여 공벽을 스캐닝하는 일종

의 첨단 검층기법이다(그림 1 참조). 즉, 발생원은 시추공 축상에서 한 번 회전하는 동안 공벽을 향하여 144(혹은 244)차례나 초음파 빔을 방사한다. 이러한 과정에서 매번 방사될 때마다 공벽으로부터 반사되어 다시 발생원 위치에 도달하는 초음파 빔의 진폭치 및 주시치는 마이크로 프로세서에 의해 자동 발취된다. 이러한 측정은 다시 발생원이 시추공 축상의 상·하로 이동될 때마다 반복되어 결국은 심도-방위각에 대한 진폭이미지 및 주시이미지를 얻게 된다. 이미 알려진 바 주시이미지는 고분해능 공경검층 결과(2-D 혹은 3-D)로 전환될 수 있기 때문에 절리의 열린 상태나 혹은 시추공 내부모양이 훌륭하게 파악될 수 있다. 만약, 초음파 빔이 절리틈새에 입사되면 산란현상에 의해 공벽으로부터 되돌아오는 초음파의 진폭은 그만큼 낮게 되어 진폭이미지에서 크게 차별화 된다. 이러한 초음파의 물리적인 산란현상은 바로 텔레뷰어가 어느 물리검층기법(예: BIPS, FMS, sonic log)보다 절리 그 자체에 대한 정확한 판단을 하게 할 수 있는 바탕이 되는 것이다. 만약, 임의의 절리면이 시추공을 절단하였을 경우(그림 1의 오른쪽 부분 참조) 시추공 공벽에는 타원형으로 나타나게 되며, 진폭이미지에서는 정현곡선(sine curve)으로 표현된다. 이때 절리면의 경사방향은 정현곡선의 최소 진폭치에 대응하는 방위각(azimuth)으로, 경사각은 시추공 직경 D와 정현곡선의 최대 진폭치에 의해 결정된다. 국내 텔레뷰어 탐사경험에 의하면 심도구간 50m에 대해 100개 이상의 절리들이 진폭이미지에서 식별되고 있는 경우는 허다하다. 여기서 관심의 초점이 되는 것은, 만약 서로 인접하는 시추공에서 그만큼 많은 양의 절리들이 관찰되었다면, 그들 중 어느 두 개의 절리들이 각각 동일한 절리면에 대응되고 있는가를 확인하는 데 있다. 이러한 분석결과는 무엇보다 절리의 연속성을 판단할 수 있는 하나의 기본자료가 된다. 따라서, 본 논문의 핵심내용은 각 절리면이 임의의 선정된 단면과 만나는 교차선 혹은 절리선을 구하는 전산처리기법을 개발하는데 있다. 여기서 임의의 단면은 두 개의 서로 인접하는 시추공 사이의 수직 단면일 수도 있다.

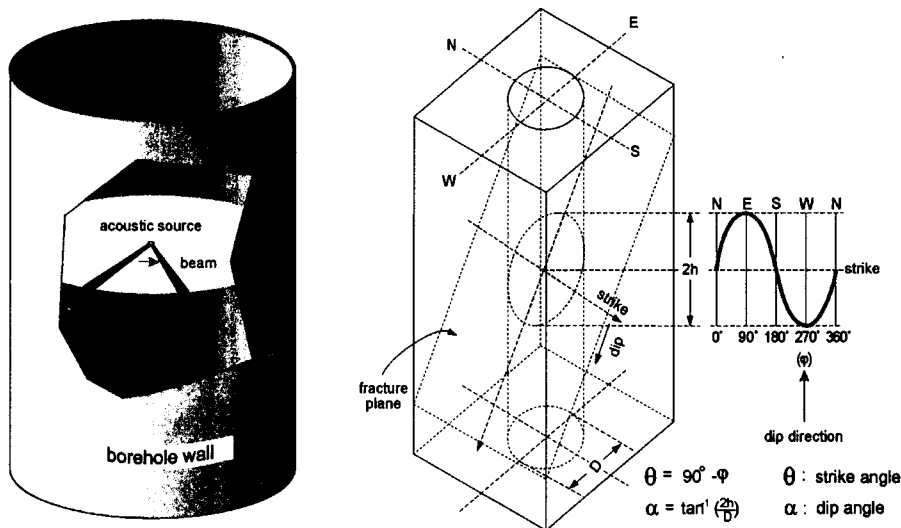


그림 1. 텔레뷰어의 근본원리.

좌: 시추공 축 상에 위치한 초음파 빔 발생원이 회전하고 또한 상하로 이동하면서 공벽을 향하여 초음파 빔을 빈틈없이 방사한다.

우: 임의의 경사를 띤 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.

2. 절리단면영상(fracture face mapping)을 위한 알고리즘개발

입의 평탄한 절리면이 두 개의 시추공을 관통하였다면, 각 시추공에서 관찰되는 절리의 경사방향 및 경사각은 동일하게 인식(예 : 텔레뷰어 이미지에서 동일한 정현곡선)될 것이다. 그러나, 각 시추공에서 관찰되는 절리의 심도는 일반적으로 달리하게 된다. 만약, 인접하는 두 개의 시추공에서 입의 절리면이 동일한 심도에서 관찰되었다면 이는 바로 그 절리면이 수평면을 나타내거나 혹은 서로 다른 절리면들의 주향 방향이 우연하게도 두 개의 시추공을 잇는 방향과 동일하였을 경우에 해당되는 것이다. 대부분의 경우 절리면의 주향 방향은 서로 달리하기 때문에 각 시추공에서 관찰되는 그들의 심도는 차이를 보여주게 된다. 여기서 심도차가 최대가 될 때는 바로 그들 방향이 수직을 이루고 있을 경우가 된다. 환원하면, 상기 심도위치를 잇는 직선은 두 개의 서로 다른 평면 즉, 두 개의 시추공을 포함하는 수직평면과 절리면이 교차하는 직선이 되는 것이다. 따라서, 각 시추공의 절리면에 의해 비롯된 절단선이 이상적인 여건(예 : 평탄한 절리면, 시추공이 휘지 않고 연직인 상태)하에서 서로 동일하다면 이는 바로 그 절리면이 양 시추공 사이에서 연장되고 있음을 시사하는 것이 되겠다. 그림 2는 상기 연계성을 입체적으로 표현하고 있다. 즉, 시추공 A에서 관찰된 절리면의 경사방향 및 경사각을 θ_A 및 α , 시추공 A, B를 잇는 경사방향을 θ_{AB} 라 할 때, 두 경사방향의 사이각 $\theta = \theta_A - \theta_{AB}$ 가 된다. 시추공 A 주위 거리 $r(m)$ 만큼 떨어진 곳에 시추공 B가 위치한다면 그 시추공과 절리면의 교차점 D_B 의 위치는 경사방향 θ_{AB} 가 달라짐에 따라 변화하게 된다. 여기서 관심의 초점이 되는 값 $DepDif = D_B - D_A$ 으로써 이를 위해 우선 경사각 β 가 구해져야 한다. 그림에서 나타낸 α, θ 및 β 의 기하학적 연계성의 의해,

$$\beta = \tan^{-1}(\tan \alpha \cdot \cos \theta)$$

이 성립되며 그로부터

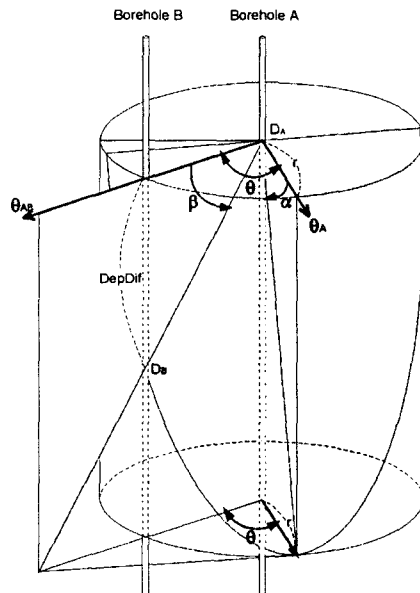


그림 2. 두 시추공 사이의 단면과 절리면이 교차하는 직선을 계산하기 위한 기하학적 표현.

$$\text{DepDif} = r \cdot \tan \beta = r \cdot \tan \alpha \cdot \cos \theta$$

를 얻게 된다. 따라서 심도차 DepDif는 주어진 r (시추공간 거리) 및 절리면 경사각 α 에 대하여 단지 θ 값에 의해 변화된다. 즉,

$\theta \rightarrow 0$	$\text{DepDif} \rightarrow r \tan \alpha$
$\theta \rightarrow 90^\circ$	$\text{DepDif} \rightarrow 0$
$0 < \theta < 90^\circ$	$\text{DepDif} > 0$
$90^\circ < \theta < 180^\circ$	$\text{DepDif} < 0$

만약, 절리자료가 시추공 A에서만 취득된다면 시추공 B의 위치는 임의로 가상 설정되어 그로 인한 수직단면(시추공 A와 B를 포함한 평면)에 표출되는 절단선(D_A, D_B)들을 관찰하게 된다. 이 때 수직단면(face)을 바라보는 방향은 선택되어야 한다. 프로그램 “FracM”은 바로 상기 내용을 바탕으로 개발된 것으로서, 지난 6여년간 절리구조에 대한 이해를 높이는 데 상당한 기여를 하여 왔다. 다음은 그의 주요 국내 응용사례를 소개하고 있다.

3. 현장응용사례

그림 3의 아랫부분은 부산 연안 퇴적층의 발달상태가 훌륭하게 관찰되고 있는 전경을 나타내고 있다. 산의 정상 주위에 천공된 시추공 BH-3에는 텔레뷰어 탐사가 수행되었으며 그로부터 얻게된 절리단면 영상결과는 일별하여 퇴적층 전경과 훌륭한 대조를 보여주고 있다. 여기에는 크게 층리를 따라 발달한 절리군과 그와 거의 수직을 이루는 절리군으로 대별되고 있음을 볼 수 있다. 한편, 절리선의 색깔 및 두께 표현은 주로 절리틈새, 암층경계, 단층 등에 따라 차별화 하였다.

그림 4는 절취사면 설계를 위한 절리단면 영상 결과를 보여주고 있다. 여기서 화살표로 표시된 절리선은 암층경계를 나타내고 있으며 이는 계획된 철도노선과는 다소 떨어져 있음을 볼 수 있다. 이러한 정보는 무엇보다 사면 안정성과 또한 사면 절취설계를 위한 바람직한 자료가 된다.

터널설계를 위한 절리단면 영상결과(그림 5참조)는 하나의 주요한 매개변수로 간주되고 있다. 특히, 단층은 용수나 암반거동을 유발할 수 있기 때문에 사전 그의 방향성(경사방향, 경사각) 규명은 터널굴착이나 안정성 재고를 위해서라도 이루어져야 할 과제라 할 수 있다. 그림 5(b)에 나타낸 터널정면을 바라보는 방향의 단면 영상 결과는 실제로 터널 막장에서의 지질구조 조사 결과(tunnel face mapping)와 거의 대등하다고 볼 수 있다.

그림 6은 시추공 B3 및 B5에서 얻게된 절리자료를 동시에 이용하여 작성한 절리단면 영상결과를 나타내고 있다. 여기에는 시추공 B3의 심도구간 E.L. 약 40m~55m와 시추공 B5의 E.L. 약 53m 주위에서 유발된 절리선들이 상호 중첩되는 경향을 보여주고 있다. 이러한 절리선들의 중첩현상은 바로 지하수 유동측면에서 관심의 초점이 되고 있으며 역시 각 시추공에서의 수리실험결과(투수계수 $K [10^{-5} \text{ cm/sec}]$)는 상기 분석내용을 훌륭하게 대변하는 것이 되고 있다.

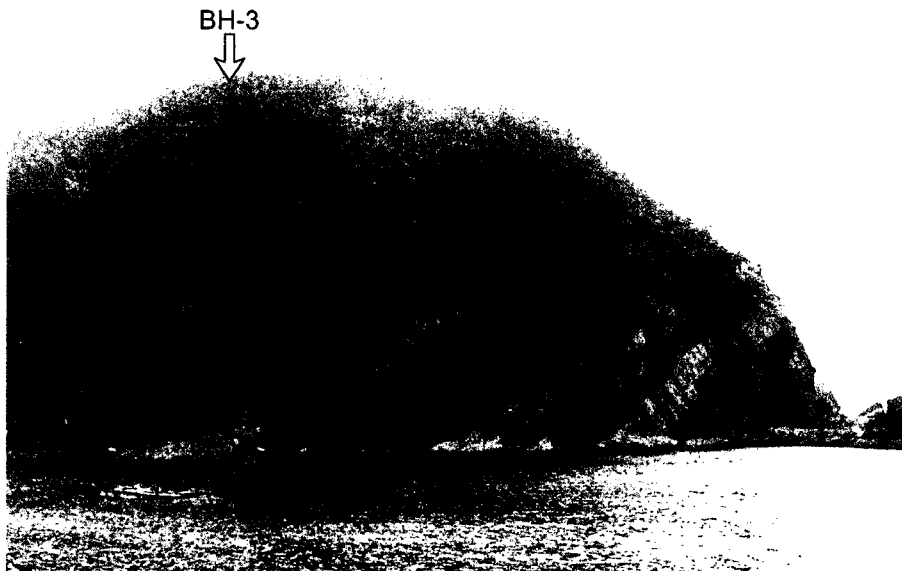
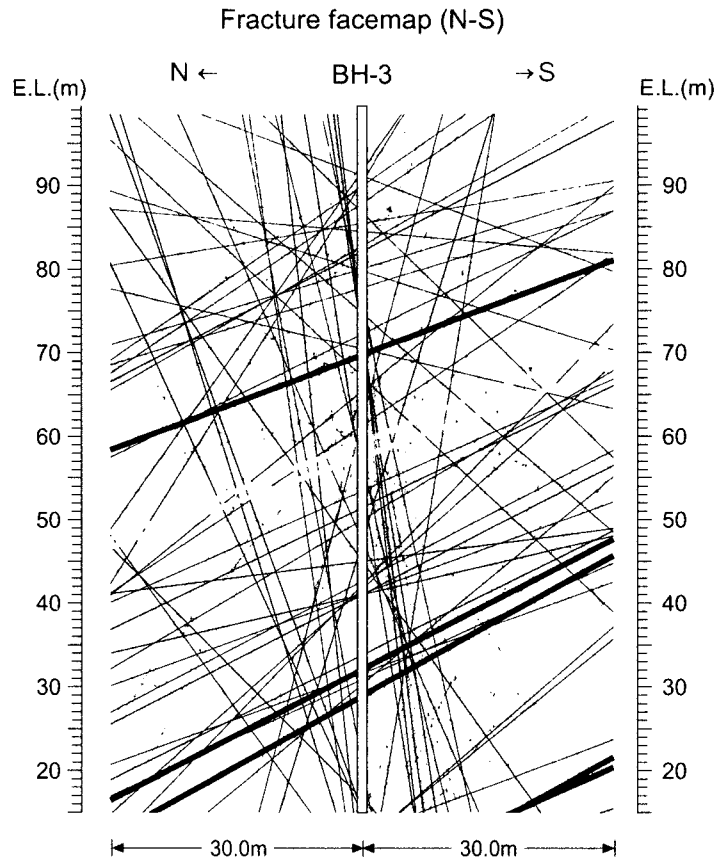


그림 3. 하나의 시추공에서 얻어진 절리자료에 의해 작성된 절리단면 영상결과. 이는 그 주위 절리구조에 대한 상당한 정보를 제시할 수 있으며 특히 그 주위 암반이 퇴적층일 경우에는 더욱 그러하다. 여기서 선정된 영상단면은 퇴적층을 바라보는 면이다.

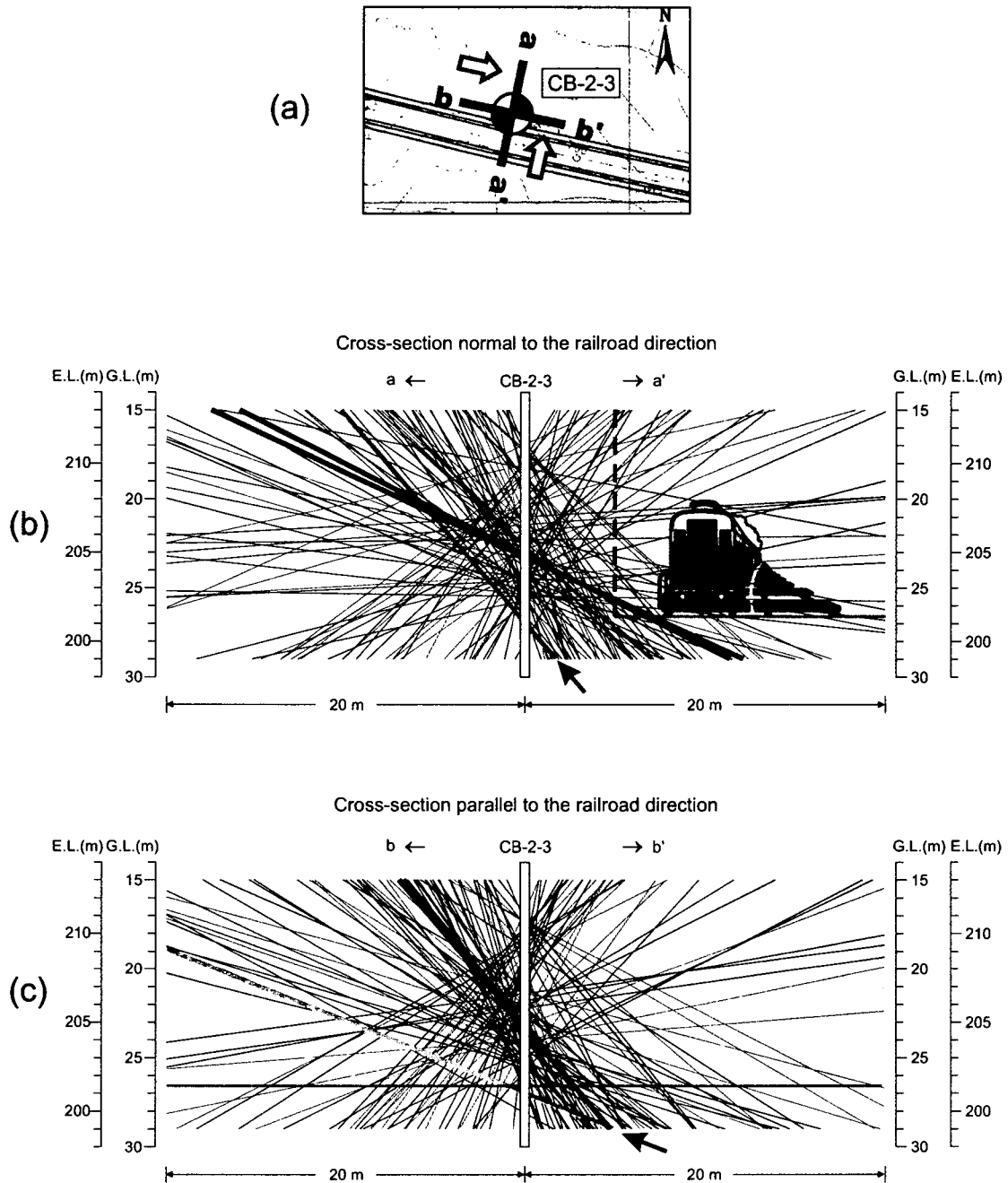


그림 4. 절취사면 설계를 위한 절리단면 영상기법의 응용.
 (a) 선정된 영상단면과 그를 바라보는 방향을 화살표로 표시하고 있다. (b) 절취사면에 수직인 절리 영상단면 결과. (c) 절취사면에 평행한 절리영상 단면 결과. 절리들은 그의 틈새 및 암상변화에 따라 분류되어 색깔이나 절리선의 굵기로 차별화 되고 있다. 예를 들어, 화살표로 표시된 절리선은 암층 경계를, 굵은 실선(적색선)은 단층에 준하는 절리에 해당한다.

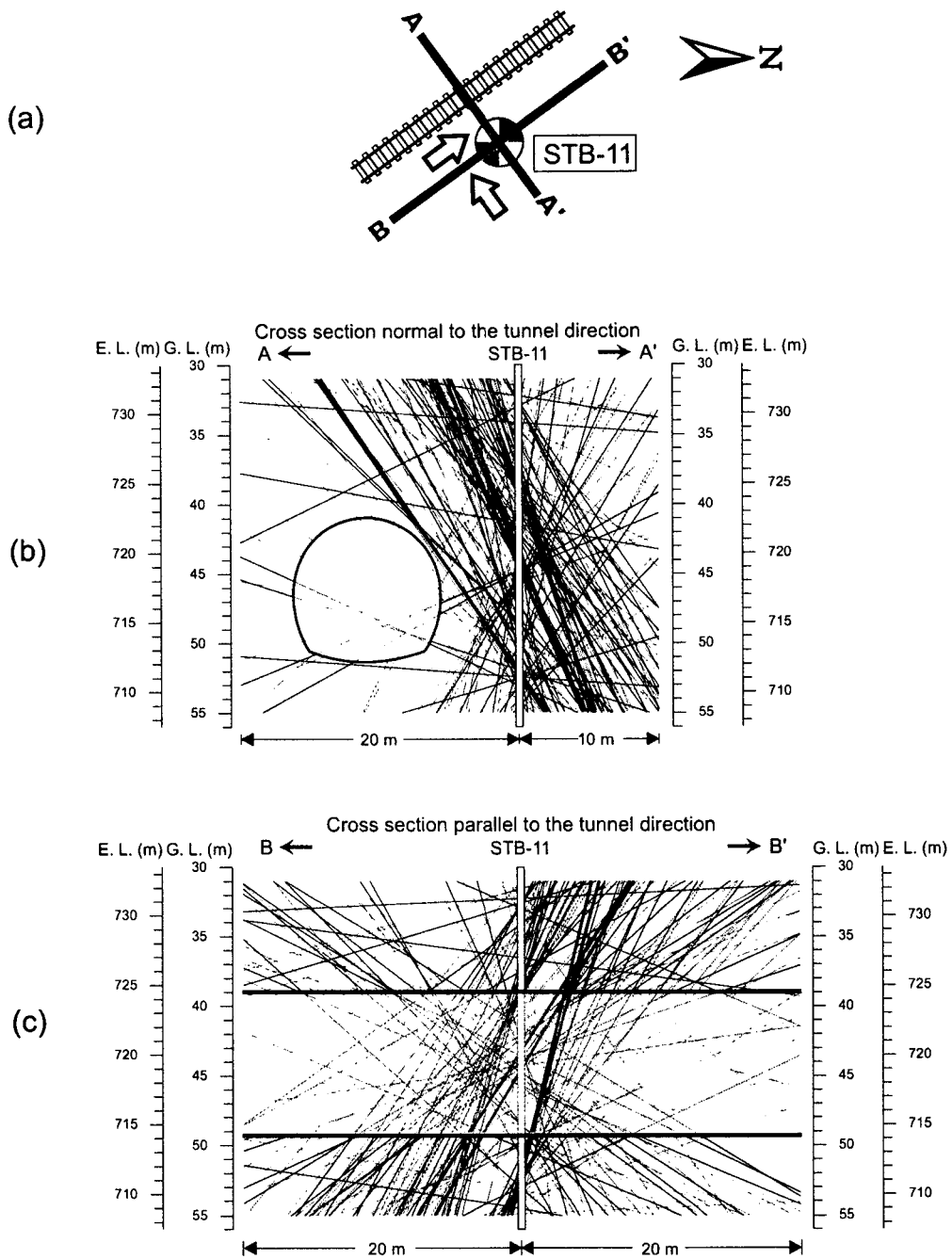


그림 5. 터널설계를 위한 절리단면 영상기법의 응용.
 (a) 선정된 영상단면(축선 A-A' 및 B-B'의 수직단면)과 그를 바라보는 방향을 화살표로 표시하고 있다. (b) 터널 막장에 대응되는 절리 영상 단면결과. (c)터널과 평행한 절리영상 단면 결과. 절리들은 그의 틈새 및 암상변화에 따라 분류되어 색깔이나 절리선의 굵기로 차별화 되고 있다.

Fracture facemap B3-B5

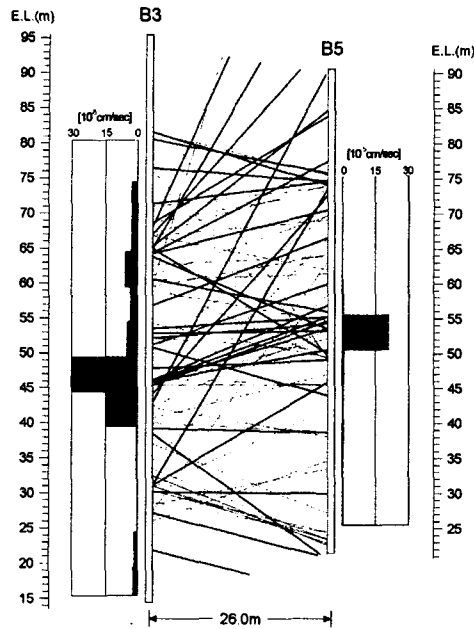


그림 6. 지하수 유동해석을 위한 절리단면 영상기법의 응용.
 선정된 영상단면이 두 개의 시추공을 포함하는 단면일 경우 각 절리선의 중첩상태는 바로 그들의 연장상태를 판단하는 하나의 지치밍 된다. 시추공 좌·우측에는 수리 실험결과를 대별하고 있다.

4. 결 론

텔레뷰어는 무엇보다 절리 판단면에서 탁월한 분해능을 갖고 있기 때문에 많은 양의 절리가 관찰되고 또한 그에 대한 여러 가지 정보(예: 방향성, 틈새)가 제공된다. 그러나, 그들 각각의 연장상태를 3차원 공간개념에 근거하여 추정하고 또한 정량화하는 데에는 상당한 노력이 요구되며 또한 그에 따른 오류도 빈번하게 발생될 수 있다. 따라서, 본 논문에는 우선 각 절리면이 임의로 선정한 단면과 교차하는 절단선 혹은 절리선을 추적할 수 있는 알고리즘, 즉 절리 단면 영상기법을 소개하였으며 나아가서 지난 수년간의 그의 대표적인 응용사례를 예시하고 있다. 여기서, 선정되는 단면은 주로 인접하는 두 개의 시추공을 포함하는 수직단면이나 터널 막장 단면 혹은 절취사면 등이 된다. 만약 절리단면 영상이 인접하는 두 개의 시추공에 의해 이루어진다면 절리 연속성에 대한 정보도 취득될 수 있다. 비록, 상기 알고리즘이 단순히 절리면이 평탄하다는 가정하에 개발된 것이기는 하나 그 결과는 제반 수리 문제나 암반의 전단력 약화문제 혹은 그라우팅 설계 등에서도 훌륭하게 대처되고 있음이 밝혀지고 있다.

5. 참 고 문 헌

1. 김중열(1998), “건설 기술자를 위한 지반조사 및 시험기술 -텔레뷰어 탐사-”, 한국암반공학회, 한국 지구물리탐사학회, 한국자원연구소.
2. 김중열(2000), “텔레뷰어 탐사의 원리 및 지반공학 분야에서의 실제적용”, 새로운 지반조사 및 평가, 분석기술 국제 심포지움 논문집, 한국건설기술연구원, pp. 191-254.