

시추공영상분석을 이용한 지하 불연속면 분포의 가시화 실용연구

Practical visualization of discontinuity distribution in subsurface using borehole image analysis

송부영(SONG, Moo-Young)

충남대 지질학과

박찬석(PARK, Chan-Seok)

충남대 지질학과

요약/Abstract

시추공 영상조사는 지하 구조를 직접 확인함으로써 좀더 정확한 자료를 얻기 위하여 실시되고 있으나, 시추공 좁은 공간내에 국한된 정보이기 때문에 원하는 공간범위의 지하 구조물에 직접적으로 적용하기 어려운 실정이다. 이에 시추공 영상 자료를 처리하고, 방향에 따른 위경사를 고려하여, 2차원의 지하 불연속면을 원하는 단면의 방향에 따라 가시화하는 프로그램을 개발하고, 지하 불연속면의 분포를 넓은 공간에 확장하여 현장에 적용함으로써 시추공 영상분석을 보완하였다. 이와 관련된 프로그램이 별도로 판매되어 일부에서 사용되고 있으나, 내용이 알려지지 않았고 일반인이 사용하는 데에 제한이 있었으므로 이번 기회에 희망자들이 쉽게 사용할 수 있게 될 것이다.

지하 구조물이 계획된 지역의 지하 단면을 작성하기 위하여 포트란과 비주얼베이직 프로그래밍 언어를 사용하여 Window GUI(Graphic User Interface) 환경으로 프로그램을 제작하였고 이 프로그램을 이용하여 전라북도 장수군 계남면 장계리 지역 터널계획 구간의 불연속면 분포도를 작성하였다. 시추공내에 국한된 불연속면을 가시화 프로그램을 이용하여 공간적으로 확장함으로써 부근 전체의 지하구조를 파악하며, 다른 지점에서의 불연속면의 분포 형태를 추측할 수 있었다. 또한 터널에 영향을 미치는 불연속면의 절리간극의 크기 범위와 불연속면들의 출현 심도 및 영향 범위 등을 계획된 터널의 방향에 따라 가시화하여 설계와 시공에 쉽게 이용하게 하였다.

주요어: 시추공 영상, 불연속면, 절리, 단면, 진경사, 위경사, 포트란, 비주얼베이직.

Borehole image analysis has been carried out to obtain the detailed geological data by approach of direct observation. Direct application of borehole image analysis inevitably gives rise to a few of restriction of data acquisition due to the limited information within narrow borehole space. Considering the apparent dip of discontinuity surface depending upon the direction, the visualized program of two-dimensional subsurface discontinuities is coded. Borehole image analysis can compensate the distribution of subsurface discontinuity extending into the expected area of investigation.

In order to draw subsurface profile in the proposed area of subsurface construction, visualized program is coded as a window GUI (Graphic User Interface) using Fortran and Visual Basic Programming languages. It is to open publicly for the usage of whoever is in want.

Discontinuity distribution map is visualized along the proposed line of tunnel in the Janggye-ri area, Jangsu-gun. Using the visualized program, the limited information from borehole spatially applies into analysis of overall subsurface structures, and the distributional characteristics of discontinuity anticipate at the proposed area. In addition, spacing and extension of joint and depth of discontinuity effecting tunnel safety can be visualized along the direction of the proposed tunnel. These lines of visualization apply design and construction of fundamental structures.

Key words: Borehole image, Discontinuity, Joint, Cross section, True dip, Apparent Dip, Fortran, Visual Basic.

서 론

지반조사에 있어서 지층분포 및 지질구조를 예측하고 그에 따른 지보패턴 및 보강방법 결정은 여러 지표조사 및 시추공 조사에서 수집된 자료를 근거로 한다. 그러나 시추코아 만으로서는 시추굴착 기술, 굴착 방법의 차이와 같이 진정한 지하정보와는 관계없는 다른 요소까지 시추코아 평가에 포함될 가능성이 있고, 암반 내에 불연속면이나 층리면의 주향, 경사 등 3차원 정보가 얻어지지 않으며, 때에 따라서는 코아 채취 까지도 곤란한 경우가 많아 지반의 정확한 평가에 어려움이 있다. 이와 관련하여 최근 토목 분야의 지하 구조물 설계와 시공을 위한 지반 조사에 있어서 시추공 영상 조사는 핵심 요소 기술로 부각되고 있다(구민호 외, 1999; 김중열, 1999; Jain, 1989). 시추공 영상조사는 지하 구조를 직접 확인함으로써 좀더 정확한 자료를 얻기 위하여 실시되고 있다.

시추공 영상촬영은 전기, 음파, 광학 등의 3가지로 분류할 수 있다. 이들은 각각 전기비저항 반응, 음파의 진폭과 주시 반응, 광학적 사진 등을 이용하여 화상처리 단계를 거쳐 심도에 따른 공벽의 상황, 불연속면의 주향, 경사, 절리간격, 암상, 불연속면 형태 등 지하 불연속면에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있다(Key, 1997; Jain, 1989). 그 중에서 BIPS(Borehole Image Processing System), BSS(Borehole Scanner System)(Tanimoto et al., 1995; Sawada et al., 1993), OBI(Optical Borehole Imager)와 같은 광학적 영상분석은 토목 공학을 위한 시추공에서 크게 이용되며, 초음파 주사형 텔레뷰어 검층(ATV; Acoustic Televierer 또는 BHTV; Borehole Televierer) 기법은 초음파 반응으로서 시추공탐사에 널리 사용되고 있다(Kamewada et al. 1990).

그러나 이러한 시추공 영상조사는 시추공 내에서의 지하 불연속면 정보에만 국한되기 때문

에 방향성, 거리 및 외형 등의 특성을 가지는 지하 구조물에 대한 적용이 어려운 실정이다. 이에 시추공 영상 자료를 보다 효율적인 불연속면의 공간적 분포의 가시화를 위하여 시추공 영상에서 얻은 정보를 이용하여 여러 방향에서의 불연속면을 영상화 하므로써 시추공 내에 국한된 불연속면의 방향을 공간적으로 확장할 수 있게 된다.

시추공 영상을 처리하여 얻은 지하 불연속면에 대한 정보들을 공간적으로 확장하고 가시화하기 위해서는 전산처리가 필수적이며, 프로그램화하여 여러 사용자들이 쉽고 신속하게 처리할 수 있는 여건을 제공해 주어야 할 것이다.

이와 관련된 연구는 FracInt(김중렬외, 1998)와 FracM(김중렬외, 2000)이 개발되어 한국지질자원연구원 및 협조기관에서 이용되어 왔고, 산업사회에서 그 효용성을 인정받았다. 반면에 이들 프로그램의 속 내용이 알려지지 않았기 때문에 이의 필요성은 실감하면서도 프로그램을 입수하지 못하는 실무자들은 불편한 점이 많았으므로, 이에 관련된 프로그램을 새롭게 제작하여 공개하고 이용할 수 있는 기회를 조성할 필요가 있었다.

본 연구에서는 OBI(Optical Borehole Imager), BIPS(Borehole Image Processing System), Borehole Televiewer 등의 시추공 영상자료의 출력 데이터 구조를 파악해 보고, 이러한 시추공 영상에서 얻어진 여러 자료들을 처리하여 방향에 따른 위경사를 고려한 2차원의 지하 불연속면을 가시화해 줄 수 있는 프로그램을 개발하고, 개발된 프로그램을 현장에 적용함으로써 시추공 영상자료를 보완하여 지하 불연속면의 분포를 추정하고 분석하는데 그 목적이 있다.

연구 방법

본 연구에서는 현재 국내에서 상용화되어 있는 시추공 영상자료의 출력 구조를 파악해 보고, 파악된 자료를 이용하여 불연속면을 가시화하기 위한 프로그램을 Fortran과 Visual Basic Programming Language를 이용하여 Window GUI(Graphic User Interface) 환경으로 제작하였

다. 작성된 불연속면 가시화 프로그램을 '전주-함양간 고속도로 공사' 구간 내의 진라북도 장수면 계남면 장계리 지역의 터널 계획구간 내에서 촬영된 2개공에서의 시추공 영상(Optical Borehole Image)을 분석하여 나온 결과 자료에 적용하여, 적용지역에서의 불연속면 분포도를 절리간격(aperture)별로 작성해보고, 이를 선정된 시추공 영상과 시추 주상도와와의 비교를 통하여 지하구조물(터널)에 미치는 지하 불연속면의 상태를 예측하였다(Fig. 1).

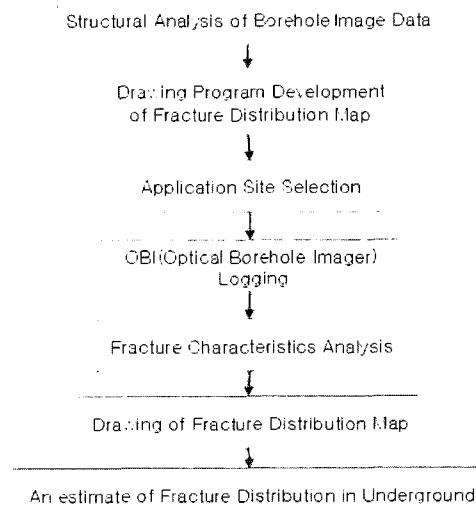


Fig. 1. Flow chart of the study.

1) OBI 자료구조

OYO사의 OBI 시추공 영상을 GMI·ImagerOPTV™ 소프트웨어를 이용하여 시추공 영상을 분석할 때, 불연속면(층리, 절리, 단층, 열리, 편리, 편마구조 등)의 판별, 층구조의 경계 등 전체적인 성격은 관찰자의 관찰사항에 따라 분류하고(Nakanish and Shinji, 1994), 이들의 위치, 방위 등의 기하학적 특성은 위 절에서 검토한 방법으로 제작된 프로그램으로 계산하여 기본자료를 획득할 수 있다. 이러한 과정을 마치게 되면 관측자료는 아스키 파일로 저장되는데 이 파일에는 불연속면의 심도, 경사, 경사방향, 절리간격의 크기, 형태 등이 숫자와 문자의 형태

로 저장된다.

2) 텔레뷰어 자료구조

초음파 텔레뷰어로서 취득된 검층자료는 Unix 환경 하의 'SIGMA' 소프트웨어와 Window 환경하의 'WELLCAD' 소프트웨어(Keys, 1997)를 통하여 진산 처리과정을 거친 파일은 진폭이미지, 주시이미지, 3차원 영상, 암석강도지수, 절리면의 방향성 표시 등으로 구성되는 출력물을 생산하고, 이 파일에서 절리면에 대한 절리간극의 크기를 정의하여 주면 불연속면의 심도, 경사방향, 경사, 타입, 절리간극 등 아스키 파일이 형성된다.

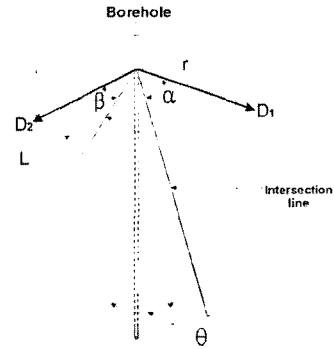


Fig. 2. Principle of apparent dip of discontinuity in a borehole.

3) 위경사 계산

Fig. 2 에서 어떤 경사각(α)과 경사방향(D_1)을 갖는 불연속면을 가정할 때, 공벽과 불연속면이 만드는 경계선은 펼쳐진 영상에서는 타원으로 나타난다. 이때 임의의 방향(D_2)의 단면에서는 불연속면의 진경사(α)보다는 작은 각(β)을 보인다. 이렇게 단면의 방향에 따라 달라져서 나오는 각(β)을 겉보기 경사 혹은 위경사(apparent dip)라고 한다. 이러한 위경사는 주향방향으로 갈수록 각이 작아지며, 주향방향에서는 0° 를 보이고, 경사방향에서는 가장 큰 각, 즉 진경사를 갖는다.

위경사의 계산은 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 불연속면의 경사방향으로부터의 단면방향각(θ), 경사각(α) 및 시추공의 반경(r)의 관계식(김중렬 외, 1998)

$$L = r \tan \alpha \times \cos \theta \quad (1)$$

에 의하여 단면방향에서 중앙 수평선으로부터 불연속면과 공벽이 만나는 지점까지의 거리(L)를 계산하게 되며, 여기서 위경사 β 는

$$\tan \beta = \frac{r}{L} \quad (2)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{r}{L} \right) \quad (3)$$

으로 구해진다.

가시화 프로그램 작성

1) 개발 환경

본 연구에서 개발한 프로그램은 FORTRAN과 Visual Basic 6.0 프로그래밍 언어를 사용하여 개발하였다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 Window GUI(Graphic User Interface) 환경으로 제작하기 위하여 거의 대부분의 과정이 비주얼 베이직 6.0을 이용하였으며, 시추공 영상 처리 결과 파일에서 진경사와 경사방향을 이용하여 위경사로 계산하여 주는 서브모듈만을 프로그램의 수행 속도 향상을 위하여 FORTRAN으로 개발하였다.

2) 프로그램 작성 과정

본 연구에서 개발한 가시화 프로그램의 작성 과정을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 본 프로그램은 입력모듈, 자료변환모듈, 선택모듈, 가시화모듈의 4가지로 구성되어 있다. 자료처리 과정을 보면 초기 입력자료는 아스키 자료로 하여 기존 공내 촬영장비인 OBI, 텔레뷰어의 자료를 사용할 수 있도록 하였다. 시추공 영상 처리 소프트웨어를 거친 아스키 파일에서 불연속면의 심도, 진주향, 진경사, 절리간극의 크기값을 초기 입력값으로 입력을 받고, 입력 파일의 종류와 형태를 결정하고 사용자가 보고자하는 단면의 방향을 북쪽을 중심으로 입력을 받게 되면 FORTRAN으로 작성된 서브모듈을 호출하여 입력방향의

직각 단면과 90°회전된 단면의 위경사와 위경사 방향을 계산하여 주게 된다. 여기에서 가시화 모듈을 호출하게 되면 최종적으로 저장된 파일에서 불연속면의 심도, 위경사, 위경사방향과 절리간극의 크기 등을 가시화 모듈로 보내주게 된다. 가시화 모듈에서는 전처리과정에서 계산된 값과 시추공의 형상, 지표고도, 터널의 형상, 계산된 단면 중 가시화하고자 하는 단면을 입력받아 좌표화하여 가시화 해주게 된다. 이렇게 가시화된 영상은 사용자의 선택에 의하여 WINDOWS Bitmap 파일의 형태로 저장할 수 있게 되어있다.

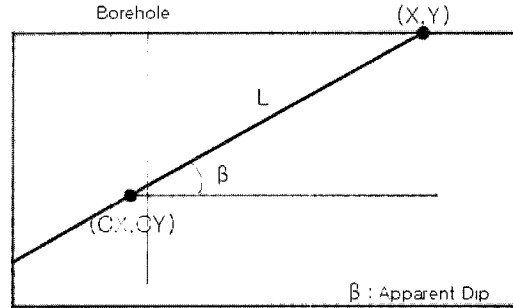


Fig. 4. Principle of coordinate calculation for visualization program.

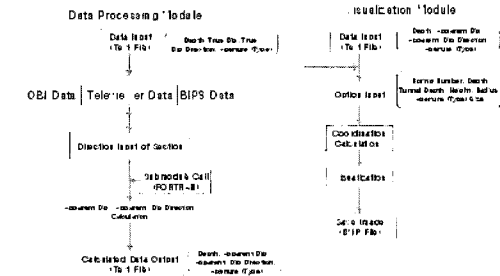


Fig. 3. Flow chart of visualization program using borehole image data.

위경사와 위경사 방향을 이용하여 방향에 따른 단면에 불연속면을 선으로 도시하기 위해서는 두 점의 좌표값을 구해주어야 한다. 한점의 좌표는 시추공 내에서 나타나는 불연속면의 심도와 시추공의 좌표로 나타나고, 다른 한점의 좌표는 위경사와 위경사 방향을 이용하여 삼각함수식에 적용하여 구하게 된다. 이 식은 Fig. 4에서와 같이 중심점의 좌표를 (CX,CY)라고 할 때 (X,Y)의 좌표는

$$X = CX + \cos(\beta \times \pi / 180) \times L \quad (4)$$

$$Y = CY - \sin(\beta \times \pi / 180) \times L \quad (5)$$

에 의하여 구해진다. 여기서 β 는 위경사각, L은 선의 길이를 말한다. 이들 두 식의 괄호 속은 프로그램 상에서 계산을 위하여 각도를 라디안 값으로 변경시켜 준다.

3) 프로그램의 실행

본 연구에서 개발한 프로그램은 두 개의 창(window)으로 이루어져 있다. 프로그램을 실행하게 되면 화면에 나오게 되는 창에서는 아스키 파일을 열고, 저장할 수 있는 문서편집 기능과 위경사를 계산해주는 역할을 하는 창이다(Fig. 5(a)). 시추공 영상 처리 소프트웨어에서 저장된 아스키 파일을 Open File 메뉴를 이용하여 입력받아 화면에 출력시켜 주고, A.D.D Calculation 메뉴를 선택하게 되면 입력한 파일의 형태와 보고자하는 단면의 방향을 입력하게 되는 창이 나오게 된다. 이러한 값을 입력하게 되면 입력된 방향과 이 방향에서 90°회전시킨 직각방향의 위경사와 위경사방향을 계산하게 되며, 이 값을 저장하고 화면에 출력해주게 된다. Face Mapping이라는 메뉴는 가시화 창을 불러주는 역할을 하며, Face Mapper1.0이라는 메뉴는 프로그램의 정보를 보여준다. Print 메뉴는 불러진 아스키 파일을 프린터기를 통하여 출력해주는 역할을 하며, EXIT 메뉴는 작업을 모두 종료시키며, 창을 모두 닫는다.

앞의 창에서 Face Mapping 메뉴를 선택하게 되면 불연속면을 가시화 시켜주는 창이 화면에 활성화된다(Fig. 5(b)). 이 가시화 창에는 앞의 창에서 계산되는 두 가지 단면에서의 심도별 불연속면의 위경사와 위경사 방향 및 절리간극의 크기를 입력받아 워크시트에 출력시키게 된다. 또한, 필요에 따라 불연속면 분포도와 함께 가시화되어야 할 여러 가지 항목을 입력받게 되어

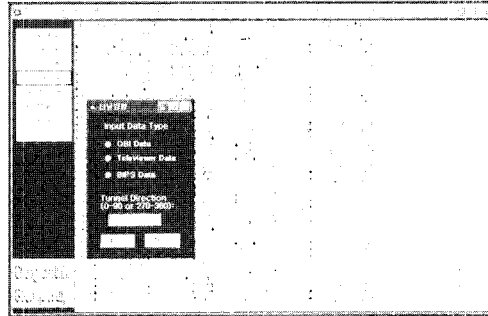
있다. 시추공의 번호 및 시추심도, 시추지점의 지표고도, 가시화될 단면의 결정, 가시화될 절리 간극의 범위와 터널의 깊이, 시추공에서의 거리, 반경, 높이 등을 입력시켜 줄 수가 있다.

선택 입력값 중 절리간극의 범위는 다섯 가지 모드로 나누어지게 된다. 이들은 시추공에서 나타나고 있는 모든 불연속면들을 표시해주는 모드이며, OBI 영상에서 Hair crack에 속하는 0~1mm 범위에 속하는 모드, 0~3mm, 3~6mm, 6mm이상의 각 불연속면을 선의 색깔과 두께를 달리하여 가시화 해주는 모드로 나누어져 있으며, 개개의 모드만으로 가시화 할 수도 있고, 선택에 따라 사용자가 보고자하는 범위를 지정해 줄 수도 있다. 텔레뷰어 데이터는 초음파의 주시에 의하여 분류되는 불연속면의 타입에 준하여 1, 2, 3, 9로 나누어 가시화 하도록 하였다.

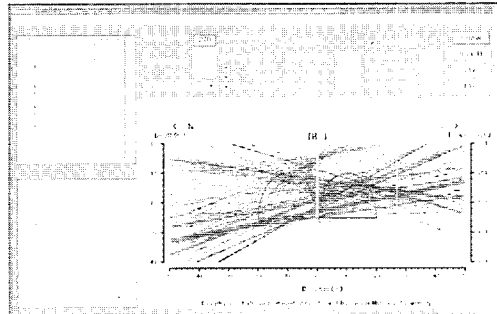
이렇게 입력된 값을 이용하여 Drawing 메뉴를 선택함으로써 불연속면들과 여러 입력 조건들은 형상화하여 그려주게 된다. 또한, 그려진 이미지의 양쪽에는 단면 방향의 이해를 위하여 다른 입력값 없이 주어진 터널의 방향을 고려하여 단면의 방향을 표시해 주게 되어 있다.

가시화 창의 기본 메뉴에는 불연속면을 가시화 해주는 Drawing 메뉴와 그려져 있는 불연속면 분포도를 지워주는 Delete 메뉴, 화면에 그려져 있는 이미지를 저장해 주는 Save 메뉴와 창을 닫아 주는 EXIT 메뉴가 버튼 메뉴로 구성되어 있다. 또한 창의 좌측 창단에는 이미 위경사와 경사방향의 계산이 끝난 파일이 일정한 형식을 갖추고 있다면 앞의 창을 띄우지 않고도 바로 가시화 창에서 불러 사용할 수 있도록 Open 메뉴를 두어 창을 다시 여는 번거로움을 없애고자 하였으며, 모든 작업을 끝내고자 할 때는 Open 메뉴 밑에 위치한 Exit 메뉴를 사용하면 된다. 이러한 메뉴를 사용하여 쉽고 간편하게 사용자가 보고자하는 방향의 단면에 대한 불연속면 분포도를 작성할 수 있다.

여기에서 작성된 모든 소스프로그램은 박찬석(2002)에 실려 있다.



(a)



(b)

Fig. 5. Visualization program of fracture distribution; (a) Data processing module, (b) visualization module

시추공 영상분석에의 적용 결과

1) 적용지역의 특성

본 연구에서 사용된 시추공이 위치한 지역은 '전주-함양간 고속도로 공사' 예정 지역인 전라북도 장수군 계남면 장계리 서측 지역으로 법화산의 해발 675m 고지를 지나는 터널 계획 구간에 속한다. 시추공이 위치한 지역은 남북방향으로 발달된 산계 내에 동서방향의 계곡부에 속하며 해발 428~435m에 위치하고 있다.

연구지역 주변의 지질은 크게 선캄브리아기의 흑운모편마암을 기반암으로 이를 관입한 동시대의 화강편마암과 중생대 트리아스기에 관입한 장수화강암, 그리고 주라기에 관입한 육십령화강암과 섬록암 등을 신생대 제 4기의 충적층이 부

정합으로 피복하고 있다(홍승호, 윤육, 1993).

본 연구에 이용된 시추공이 위치한 지역의 지질은 선캠브리아기의 화강편마암으로 구성되어 있으며 소백산 변성암 복합체에 해당하며 장수도 폭에서는 최고기 기반암체의 일부이다.

2) 시추공 영상분석 결과

선정된 시추공(TB-6, TB-7)에서 OYO사의 Geologger-3 장비를 이용하여 촬영된 OBI 영상을 GMI·ImagerOPTVTM 소프트웨어를 이용하여 시추공 영상을 불연속면(층리, 절리, 단층, 엽리, 편리, 편마구조 등)의 판별, 층구조의 경계 등 전체적인 성격을 분류하고, 이들의 위치, 방위 등의 기하학적 특성은 위 절에서 검토한 방법으로 제작된 프로그램으로 계산하여 기본자료를 획득하였다.

본 연구에서는 아스키 파일에 저장된 자료를 이용하여 심도별로 불연속면의 빈도수와 절리간격이 크기를 이용하여 심도별 공상태를 분석해 보았다. 또한, 불연속면의 경사와 경사방향을 이용하여 시추공에서의 불연속면의 주방향성을 추정해 보았다.

가. 시추공 영상분석

TB-6번 시추공은 굴착심도가 -35.3m로 지표면하 -2.2m~-32.8m 구간까지 OBI 영상 촬영이 이루어 졌으며, 케이싱 구간을 제외하고 -12.5m~-32.8m 구간에서 분석을 실시하였다.

구간별로 비교적 절리간격이 큰 불연속면들이 간혹 나타나며 절리간격이 미세한 불연속면들이 집중되어 나타나는 구간이 있으며, 불연속면들의 경사는 거의 수평을 이루고 있음을 시추공 영상을 통하여 확인할 수 있었다(Fig. 6(a), (b), (c)). 불연속면의 빈도수는 약 -12m~-21m사이에서 많이 나타나는 것을 확인할 수 있었으며(Fig. 6(d)). 절리간격의 크기가 6mm이상의 불연속면들은 나타나지 않는 것을 알 수 있었다(Fig. 6(e)). TB-7번 시추공의 영상분석결과도 비슷한 양상이며 구간 별로 분석치의 값이 다르다.

나. 시추공 주변의 불연속면 분포

Fig. 7에서는 TB 6번 시추공에서 터널의 진행 방향인 N50E의 직각단면에서 나타나는 불연속면

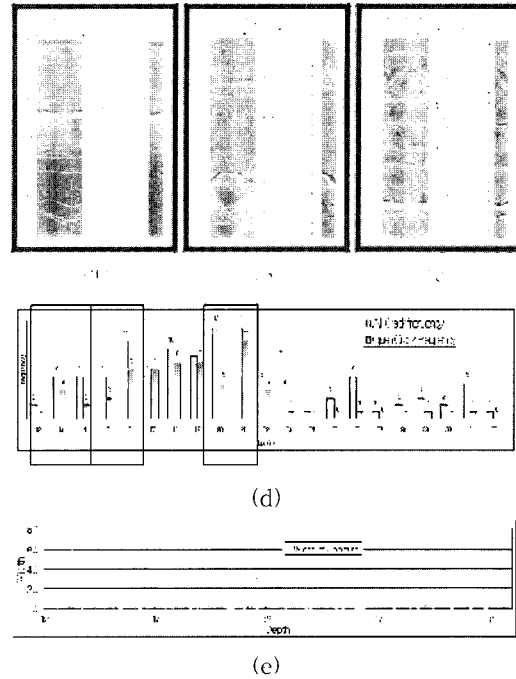


Fig. 6. Analysis of optical borehole image for the borehole TB-6.

- (a), (b), (c) Optical borehole image
- (d) Crack frequency per meter
- (e) Aperture width

들의 절리간격이 1mm이하(a), 1~3mm(b), 3~6mm(c), 1mm이하의 hair crack을 뺀 open crack과 모든 불연속면의 분포도(e)를 보여준다.

전반적으로 시추공이 있는 지점에서 터널에 향으로 영향을 미치는 불연속면들을 예측할 수가 있다. 또한, 고각의 경사를 갖는 불연속면보다는 평행 또는 저각의 경사를 보이는 불연속면들이 다수 나타나고 있으며, 본 시추공에서 불연속면 중 가장 큰 영향을 미칠 것으로 보이는 3-6mm의 절리간격을 갖는 불연속면들은 터널의 구간을 피해나가 그다지 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다(Fig. 7(c)). 또한 1mm이하의 hair crack도 터널을 지나는 빈도수가 적은 것으로 보아 그다지 영향은 없을 것으로 보인다(Fig. 7(a)). 그러나 1mm~3mm까지의 불연속면 분포도(Fig. 7(b))에서는 15m~24m 심도에서 30~45° 정도의 경사를 가지고 나타나는 다수의 불연속면에

의하여 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 그리고, 불연속면들의 빈도수에 비하여 터널의 영향을 주는 불연속면들의 빈도수는 그다지 많이 나타나고 있지 않는 것으로 해석된다(Fig. 7(d), (e)).

터널 진행 방향의 단면의 불연속면의 분포도를 보여주는 Fig. 8은 터널에 종으로 영향을 줄 수 있는 불연속면들을 예측해 볼 수가 있다. Fig. 8에서는 경사를 보이는 불연속면들이 다수 나타나고 있으며, 앞에서는 터널의 영향을 주지 않을 것으로 보이던 3~6mm의 절리간격을 갖는 불연속면들이 시추공의 위치에서 남동측으로 10~20m 정도의 지점에서 터널의 영향을 줄 것으로 예측되고 있다.(Fig. 8(c)) 또한 1mm이하의 hair crack은 남동측에서는 거의 터널의 영향을 주지 못하며, 북서측으로 진행되어 터널에 영향을 미칠 것으로 파악된다(Fig. 8(a)). 터널의 횡단 가장 영향을 줄 것으로 예측되었던 1mm~3mm까지의 불연속면은 종단면에서도 경사를 가지고 나타나는 불연속면들에 의하여 가장 많은 영향을 줄 것으로 추정된다(Fig. 8(b)).

터널의 종단면에 대한 불연속면 분포는 시추공이 터널의 직상부에 위치하고 있지 않고 터널에서 떨어져서 조사되었다면, 단면에 나타나고 있는 불연속면에 대한 선들은 경사 방향을 고려하지 않은 선들이기 때문에 터널의 단면에서 나타나는 불연속면들의 분포는 틀려질 수가 있어 신뢰도가 떨어진다고 할 수 있다.

TB-6번은 상 하행선의 터널의 중간지점에서 조사를 실시한 것이므로 터널의 단면에서 나타나는 선구조들과는 약간의 차이가 발생할 수 있다. 시추공 번호 TB-7에서도 일부 절리간격이 큰 불연속면이 존재하는 것 이외에는 유사한 결과를 보이므로 여기에서 상술하지 않기로 한다.

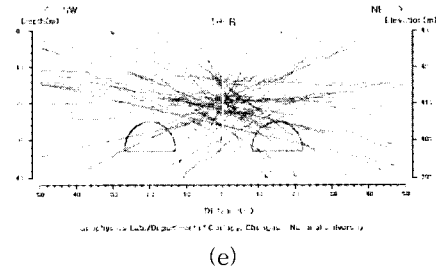
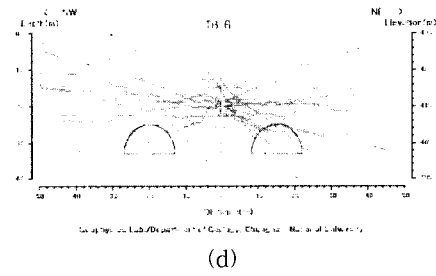
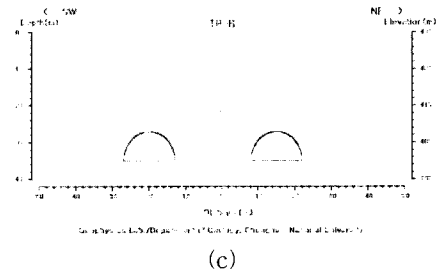
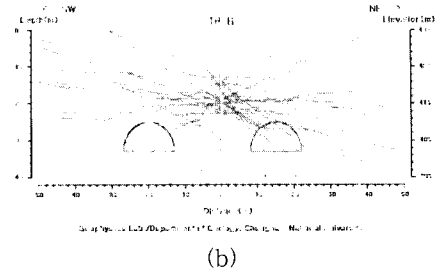
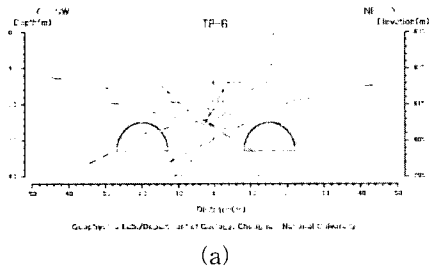


Fig. 7. Fracture distribution map along the cross section of the tunnel direction in terms of aperture at the borehole TB-6. (a) under 1mm (b) 1-3mm (c) 3-6mm (d) 1-6mm (e) all crack

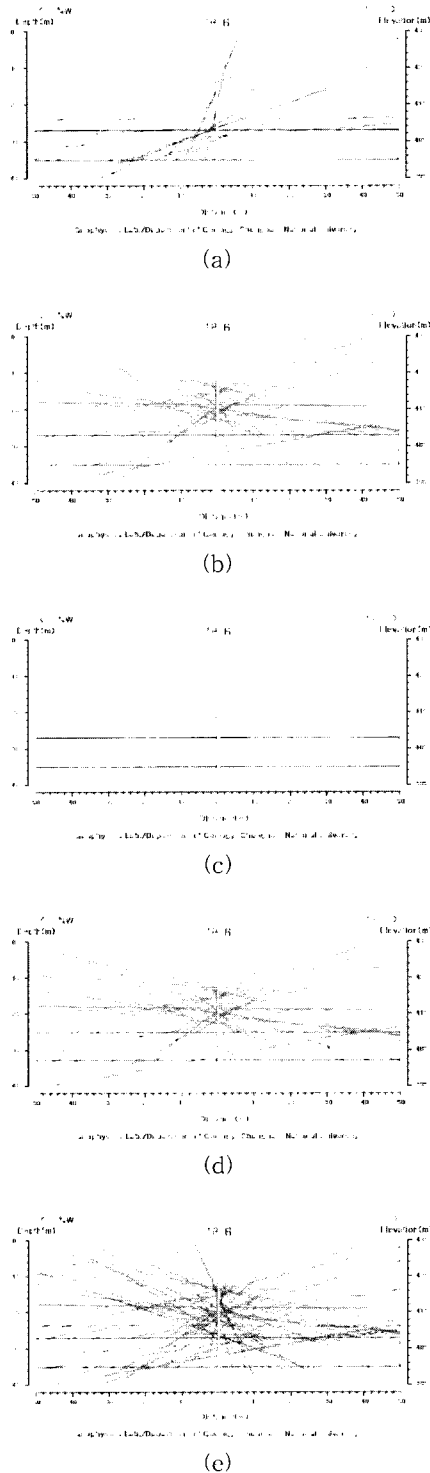


Fig. 8. Fracture distribution map along the parallel section of the tunnel direction in terms of aperture at the borehole TB-6. (a) under 1mm (b) 1-3mm (c) 3-6mm (d) 1-6mm (e) all crack

3) 시추공 영상과 연장 불연속면 비교 분석

시추공 영상분석만으로는 불연속면들이 어떻게 공간적인 분포를 가지고 있는지를 알 수 없으며, 불연속면 분포도에서는 선으로만 표현이 되기 때문에 불연속면들이 어떠한 형상으로 나타나는지를 이해하기가 힘들다. 한편, 불연속면 분포도에서 심도에 따른 불연속면들의 형상을 확인하여 연장을 하면 연장된 다른 지점에서의 불연속면들의 시추공내의 형상을 예측할 수 있을 것이다.

두 개의 시추공간의 불연속면들의 관계를 확인하기 위하여 두 시추공이 만나는 단면에서의 지형 고도를 고려한 분포도를 작성하고 시추공 주상도와 비교하였다(Fig. 9). 두 시추공에서 나오는 불연속면의 방향성은 어느 정도 일치하는 것을 알 수 있다. 큰 절리간극을 갖는 불연속면들은 일치하지는 않지만 시추공영상에 큰 절리간극이 지나가는 상대 시추공에서는 많은 절리들이 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

TB-6번 시추 주상도에서는 연암이 존재하지 않지만, TB-7번에서는 경암의 상부에 연암이 확인되고 있다. 불연속면들은 거의 대부분 연암과 경암 상부에서 가장 밀집되어 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 두 시추공 모두 경암부에서 절리간극이 3mm이상 크기를 갖는 절리들이 나타는 것을 보여주고 있다(Fig 9).

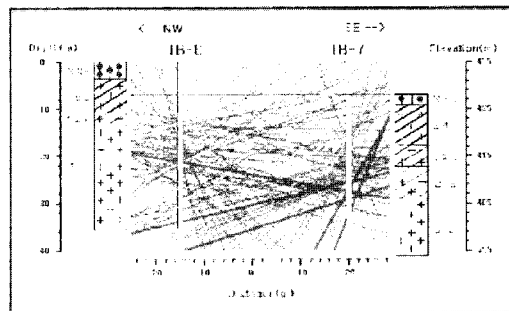


Fig. 9. Fracture distributions extended to borehole logs at the borehole TB-6 and TB-7.

토 의

터널 막장에서 표출되는 절리들의 발달상태(fracture face mapping)와 그들이 터널 진행 방향을 따라 연장되는 상태를 파악한다는 것은 터널 굴착 과정에서 흔히 주 관심대상이 된다(김중렬외, 1999). 이러한 지하의 상태를 예측하기란 상당히 어려운 부분이다. 본 연구는 이와 같은 터널 진행 방향에 따른 불연속면들의 발달상태를 파악해 보고 어떻게 적용이 될 수 있는가를 알아보기 위한 것이다.

시추공 영상의 획득과 화상처리로서 얻을 수 있는 지하 정보는 기존의 시추코아만으로서 얻어지는 직접적 정보에서 미비했던 구조의 방향성 및 정밀한 심도 계측 등의 부분에서 획기적인 보완을 마련해 주고 있다(송무영과 고희재, 2000). 또한, 시추공 영상은 암반의 불연속면 발달상태에 대한 그의 탁월한 분해능, 암석강도에 대한 정보 제시 및 다양한 분석 기술 개발에 따른 명확한 토목 설계 매개 변수 산출 등에 이용되고 있다(Sakarai, 1994; Hornby et al., 1992).

본 연구에서는 시추공 영상의 종류 중 OYO사의 Geologger-3를 이용한 OBI(Optical Borehole Imager) 영상을 선택하여 분석하였다. 적용지역으로는 '전주-함양간 고속도로 공사 10공구' 구간 중 터널 계획구간에서 지반조사를 위해 굴착된 시추공을 이용하여 시추공 영상 촬영을 실시하였고, 촬영된 시추공 영상을 기존 소프트웨어로 처리하여 얻은 결과물을 정리하여, 선정된 시추공의 불연속면들의 형상, 심도별 빈도수, 불연속면들의 심도와 절리 간극의 관계와 불연속면들의 경사방향 등을 분석해 보았다.

본 연구에서 제작한 프로그램을 이용하여 적용 시추공의 선구조 분포도를 시추공의 위치에서 터널의 횡단면과 종단면에 대하여 불연속면의 절리간극의 크기를 4종류로 구분하여 분포도를 작성해 보았다. 그 결과 TB-6번에서는 시추공에서 가장 큰 절리간극을 갖는 불연속면들이 횡적으로는 영향을 주지는 않지만, 종단에서는 10m~20m에서 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 3mm 이하의 불연속면들이 종·횡단에서

모두 영향을 미치는 것을 추정할 수 있었다. 여기에서 알 수 있듯이 불연속면 분포도를 작성함으로써 불연속면들의 2차원적인 분포를 쉽게 이해할 수 있었으며, 터널에 영향을 미치는 불연속면의 절리간극의 크기 범위와 불연속면들의 출현심도 및 영향 범위 등을 눈으로 확인할 수 있으므로 정량화에 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

이러한 불연속면 분포도는 시추공 내에서 나타나는 불연속면들이 모두 무한한 연장성을 갖는다는 가정에서 가시화 된 것이므로, 실제적인 분포와는 차이가 있을 것이다. 이러한 점을 보완해 주기 위해서는 여러 가지의 불연속면 형성 메카니즘의 분석이 선행되어야 할 것이다. 또한 계속해서 프로그램을 발전 시켜 3차원 선구조 분포도를 작성하고 그 곳에 지하구조물의 형상을 입력하여 본다면 위경사의 계산이 필요 없이 공간적인 선구조 분포 이해에 더욱 도움을 줄 것으로 보인다.

불연속면 분포도는 모든 것이 선으로 표현되기 때문에 불연속면들의 형상을 이해하기가 힘들다. 그렇기 때문에 시추공 영상과의 비교를 통하여 시추공에서 나타나는 불연속면의 영상을 연장함으로서 지하 구조물에서 나타날 불연속면들을 예측해보고자 하였다. 그 결과 TB-6번에서 결정된 단면에서 예측된 터널의 불연속면 형상은 절리간극이 작은 불연속면으로 이루어지고 적은 빈도수를 보이는 형상을 예측할 수 있을 것이다.

또한, 두 개의 시추공간의 불연속면들의 관계를 확인하기 위하여 두 시추공이 만나는 단면에서의 지형 고도를 고려한 분포도를 작성하고 시추공 주상도와 비교해 본 결과 두 시추공에서 나오는 불연속면의 방향성은 어느 정도 일치하는 것을 알 수 있었으며, 큰 절리간극을 갖는 불연속면들은 일치하지는 않지만 시추공영상에 큰 절리간극이 지나가는 상대 시추공에서는 많은 절리들이 나타나고 있는 것으로 파쇄대의 형상을 추정할 수 있다.

이러한 상세한 시추공 영상에서 획득된 자료와 불연속면 분포도 작성 등, 상세한 지하 정보의 획득과 적절한 해석의 결과는 터널 분야에서 뿐만 아니라 지질공학 전반에서 더욱 활용화 될

것으로 예측되며 급변에 작성된 프로그램은 누구나 쉽게 사용할 수 있을 것이다.

결 론

본 연구는 시추공 영상자료를 보완하여 지하 불연속면의 분포를 분석하고 가시화하는데 그 목적이 있었다. 연구 지역을 선정하여 시추공 영상 촬영을 실시하여 자료를 분석하였으며, 분석된 자료를 이용하여 지하 불연속면 분포도를 작성하기 위하여 프로그램을 제작하고 이를 이용하여 불연속면 분포도를 작성한 후, 지하 불연속면의 분포를 공간적으로 확장하여 지하구조물에 미치는 영향과 불연속면의 형상을 예측해 보았다. 따라서 연구 결론은 다음과 같이 정리된다.

1. 본 연구에서 개발한 가시화 프로그램을 이용하여 시추공내에 국한된 불연속면을 공간적으로 확장하므로써 지하구조를 파악하며, 다른 지점에서의 선구조 분포 형태를 추측할 수 있었다.
2. TB-6 과 TB-7 시추공영상에서 추출된 데이터를 입력하여 지하 불연속면 분포를 가시화한 결과, 절리간극이 큰 불연속면보다는 절리간극이 3mm 이하의 불연속면이 터널에 영향을 줄 것으로 예측되며, 3mm 이상의 절리간극을 갖는 불연속면들은 시추공에서 수 십 미터 떨어진 곳에서 터널에 영향을 줄 것으로 파악된다.
3. 시추공영상과 지하 불연속면 분포도의 비교를 통하여 터널부에서의 불연속면의 형상을 예측해 본 결과, 결정된 단면에서 예측된 터널의 불연속면 형상은 적은 빈도수를 보이며 절리간극 또한 작은 불연속면으로 이루어진 형상으로 나타날 것으로 추정된다
4. 두 개의 시추공간의 불연속면들의 관계를 확인하기 위하여 두 시추공이 만나는 단면에서의 지형 고도를 고려한 분포도를 작성하고 시추공 주상도와 비교한 결과 두 시추공에서 나오는 불연속면의 방향성은 어느 정도 일치하는 것을 알 수 있었으며, 불연속면들은 거의 대부분 연압과 경압 상부에서 가장 밀집되어 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

5. 본 연구에서 제작한 프로그램을 이용하면, 방향에 따른 불연속면의 분포를 사용자가 쉽고 신속하게 가시화하여 터널 굴착과 보강공법 결정에 이용할 수 있음을 확인하였다.

사 사

본 연구는 대덕공영(주)와 (주)용마엔지니어링의 협조를 받아 현장측정이 가능하였으므로 이에 심심한 감사함을 드립니다. 자료측정과 분석에서 많은 도움을 준 충남대의 신광수, 유영철, 서기황, 김환석 님들에게도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 구민호, 이동우, 원경식, 1999, 시추공 텔레뷰어 및 BIPS의 영상자료 해석을 통한 파쇄 매질의 투수율텐서 계산 프로그램 개발 및 현장 적용, 대한지질공학회지, 9(3), p. 187-206.
- 김중열, 1999, 텔레뷰어탐사, 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술, p.279-356.
- 김중열, 김유성, 김천수, 배대석, 김경수, 현혜자, 1999, 단열탐색 산출 및 정량화를 위한 효율적인 전산처리 기법, 99 대한지질공학회 정기학술발표회, p. 67-71.
- 김중열, 김유성, 현혜자, 1998, 석재자원조사 및 산업화 연구, 한국자원연구소, p. 515-535
- 김중열, 김유성, 현혜자, 2000, 절리 암반의열환경 거동 특성 연구-절리구조 및 암반성상 파악을 위한 텔레뷰어 및 칼라스캐너의 응용, 한국자원연구소
- 김하진, 정용권, 1990, Fortran 프로그래밍, 형설출판사, pp. 323.
- 송무영, 교회재, 2000, 시추공 영상 분석을 통한 지반구조 및 암상 해석원리와 그 사례 대한 지질공학회지, 10(2), p. 175-194.
- 박찬석, 2002, 시추공영상자료를 이용한 지하불연속면 분포의 가시화 연구, 충남대 석사학위논문, pp. 80
- 홍승호, 윤욱, 1993, 장계도폭 지질보고서, 한국자원연구소, pp. 17.
- Hornby, B. E., Luthi, S. M., and Plumb, R. A.,

- 1992, Comparison of fracture apertures computed from electrical borehole scans and reflected Stoneley waves: an integrated interpretation, *The Log Analyst*, 33(1), p. 50-66.
- Jain, A. K., 1989, *Fundamentals of digital image processing*, Prentice Hall, Inc.
- Kamewada, S. H., Gi, S., Taniguchi, S. and Yoda. H., 1990. Application of borehole image processing system to survey of tunnel, in *Rock Joint, Barton & Stephansson (eds)*, Balkema, Rotterdam, p. 51-58.
- Keys, W. S., 1997, *Borehole Geophysics in Environmental Investigations*, Lewis Publishers, pp. 176.
- Nakanish A. and Shinji, M., 2000, An application tunnel mechanical prediction by using borhole image data, *OYO Technical Report*, No.20, p. 103-112.
- Sakarai. 1994. Visualization of Boreholes. 土と基礎, The Japanese Geotechnical Society. 42(5)(in Japanese), p. 13-18.
- Sawada, T., Izutsu, T., Sugiyama, R. and Sakata. H., 1993. On-site Application of 360o-view borehole Color TV System. 土と基礎, The Japanese Geotechnical Society. 41(9)(in Japanese), p. 37-40.
- Tanimoto, C., K. Kishida, T. Ando, S. Murai and T. Matsumoto, 1995, Immediate image and its analysis of fractured/jointed rock mass through the borehole camera, in *Fractured and Jointed Rock Masses* Myer, Cook, Goodman & Sang(eds). 1995. Balkema, Rotterdam, p. 219-227.
- E-mail : mysong@cnu.ac.kr.
- 박찬석(PARK, Chan-Seok)
충남대 지질학과
E-mail : pcs91@dreamwiz.com.

** 2001, 2, 18 최종 교정 완료.