

[기술보고]

터널의 굴착면 전반부에 분포하는 절리의 예측

황 상 기*

배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과

[Technical Report]

Prediction of the Fractures at Inexcavation Spaces Based on the Existing Data

Sang-Gi Hwang*

Dept. of Civil, Environment, and Railroad Engineering, PaiChai Univ.

Received 17 November 2014; received in revised form 4 December 2014; accepted 8 December 2014

터널의 굴착과정에서 막장전반부에 분포하는 절리를 예측하여 그들로 인한 붕괴를 예방하기 위해 보강계획을 수립하는 것은 매우 중요한 사안이다. 그러나 빠른 굴착과정에서 절리의 분포를 충분히 조사하고 예측하는 것은 쉽지 않은 일이다. 본 연구는 굴착면 전단부에 분포하는 절리를 예측할 수 있는 새로운 통계적 기법을 제시하고자 한다. 제시될 방법은 단일 절리군에 대한 절리간격의 누적분포도를 이용한 절리분포의 예측이다. 누적분포도는 수평축에 절리를 동일간격으로 순차적 배열을 한 후, 수직축에 누적간격을 기준으로 각 절리를 하나의 점으로 표기한다. 이 도표에서, 표기된 점들이 선형을 이루면 절리의 분포양상이 규칙적임을 의미하며, 직선의 기울기는 절리의 간격을 의미한다. 기울기가 낮으면 절리사이의 간격이 적은 것이다. 점들의 분포가 군집형을 이루면 이는 절리의 분포양상이 군집형을 이룸을 의미한다. 현장에서 조사된 자료를 누적분포도에 점기하면 특정 절리군에 대한 분포양상이 분포도에 표기될 것이고, 이 분포양상을 연장하면 앞으로 굴착될 굴착면 전방의 절리분포를 예측할 수 있을 것이다. 실 터널현장에서 10 m 간격에서 측정된 특정 절리군에 대한 누적분포도 분석이 수행되었으며 이를 기반으로 3 m 전방의 미 굴착구간에 대한 절리분포가 예측되었다. 예측결과를 실제 현장자료와 비교한 결과 누적분포도는 전방절리를 적절히 예측하고 있었다. 분포도의 특성상 점기된 절리들의 선형과 등간격의 군집형태는 그 자체로 절리의 분포가 규칙적이며 누적분포도의 예측이 정확할 수 있음을 의미하는 것이다. 그러므로 본 연구는 향후 누적분포도의 분포양상에 대한 고찰과 그 결과의 넓은 공유가 있기를 바란다.

주요어: 터널조사, 절리예측, 터널데이터베이스, 3D 절리조사, 절리간격 누적분포도

Understanding of fracture networks and rock mass properties during tunnel construction is extremely important for the prediction of dangers during excavation, and for deciding on appropriate excavation techniques and support. However, rapid construction process do not allow sufficient time for surveys and interpretations for spatial distributions of fractures and rock mass properties. This study introduces a new statistical approach for predicting joint distributions at foreside of current excavation face during the excavation process. The proposed methodology is based on a cumulative space diagram for joint sets. The diagram displays the cumulative spacing between adjacent joints on the vertical axis and the sequential position of each joint plotted at equally spaced intervals on the horizontal axis. According to the diagram, the degree of linearity of points representing the regularity of joint spacing; a linear trend of the points indicates that the joints are evenly spaced, with the slope of the line being directly related to the spacing. The linear points which are stepped indicates that the fracture set show clustered distribution. A clustered pattern within the linear group of points indicates a clustered joint distribution. Fractures surveyed from an excavated space can be plotted on this diagram, and the diagram can then be extended further according to the plotted diagram pattern. The extension of the diagram allows predictions about joint spacing in areas that have not yet been excavated. To test the model, we collected and analyzed data during excavation of a 10-m-long tunnel. Fractures in a 3-m zone behind the excavation face were predicted during the excavation, and the predictions were compared with observations. The methodology yielded reasonably good predictions of joint locations.

Key words: tunnel survey, joint prediction, tunnel DB, 3D Survey, accumulative spacing diagram

*Corresponding author: sghmap@pcu.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

터널의 설계과정에서 암반상태를 충분히 파악 한다는 비현실적이다, 그러므로 시공 과정에서 굴착된 암질을 조사하고 그 결과를 이용하여 막장의 앞부분 지질상황을 예측하여 효율적인 시공을 수행하고자 하는 시도가 끊임없이 이어져 왔다. 터널의 시공에 위협적인 요소로는 크게 절리로 구분된 암괴의 붕괴, 심한 풍화대나 단층대와 같은 급격한 암상의 변화 및 지하수와 같은 3가지 요소로 정리할 수 있겠다. 본 연구는 이들 중 첫 번째인 암괴에 관한 내용으로, 그 암괴를 만들 수 있는 절리의 분포예측을 위한 새로운 방법의 제안을 목적으로 한다.

절리의 분포 예측을 위하여 절리의 분포를 적절한 통계적 기법으로 분석하려는 다양한 연구가 수행된바 있다. 초기 연구는 스캔라인에 접한 절리간격의 분포를 이용한 RQD 경험식의 적립(Priest and Hudson, 1976, 1981; Hudson and Priest, 1979; Wines and Lilly, 2002; Peacock, 2006) 등을 위한 기본 연구로, Priest (1993)는 절리 간격의 분포에 관한 연구는 스캔라인에 접하는 모든 절리를 대상으로 하는 “total spacing”, 특정 절리군을 대상으로 수행하는 “set spacing”과 3차원 공간에서 절리와 절리의 간격을 절리면에 수직인 방향으로 측정하는 “normal set spacing” 방법으로 구분할 것을 제시하였다. 후속 연구들에서는 절리간격의 분포 양상을 지수, 로그정규, 정규분포 등으로 분류하고 있다 (Wallis and King, 1980; Einstein and Baecher, 1983; Rives et al., 1992; Wu and Pollard, 1995).

최근 활발히 진행되는 단열의 분포예측 연구는 석유 산업이나 지하수 분야에서 암반 대수층의 모델을 위한 연구들로 탄성파와 같은 물리탐사자료를 이용하여 단열의 위치를 파악하거나(Chopra, 2002; Neves et al., 2004; Chopra and Marfurt, 2007; Dengliang, 2013), 단층과 연계된 절리의 형태, 역학 등의 구조지질학적 형상을 적용하거나(Ben-Zion and Sammis, 2003; Questiaux et al., 2010), 혹은 단층 주변의 BIPS 자료 등으로부터 유추된 지질구조로부터 응력장의 변화를 이용한 절리군의 모델 등이(Maerten, 2010; Phillips et al., 2014)이 주를 이루고 있다.

이와 같은 새로운 연구들에도 불구하고 터널 시공 중 단열의 분포를 모델하여 전방에 빠지는 블록이 존재하는지를 확인하는 것은 현장의 여건상 매우 어렵다. 시공의 성격상 매 막장에서 선진보링이나 탄성과 탐사를 수

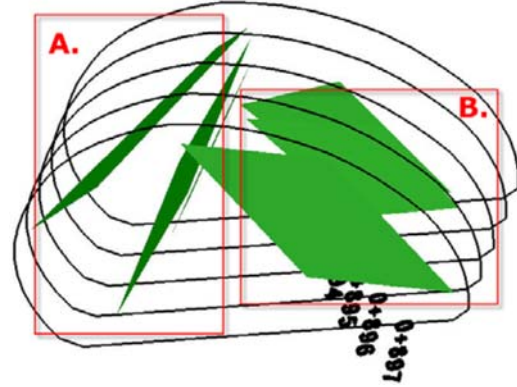


Fig. 1. Fractures parallel to the tunnel line (A type fractures) and crossing the tunnel line (B type fractures). See details in text.

행하여 이를 이용한 단열군의 모델을 수행하는 것은 불가능하며, 심지어 막장에 문제가 발생하였을 경우에도 이와 같은 정밀조사와 분석은 불가능한 실정이다. 그러므로 본 연구는 단순 관찰을 근거로 절리의 분포를 예측할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

절리는 조를 이루며, 특정한 양상으로 배열한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 터널에 분포하는 절리나 단층 등의 지질구조에 의해 형성되는 블록의 존재와 안정성 평가를 위해서는 선행막장에 존재할 절리의 분포를 예측할 수 있어야 한다. 이를 위하여 본 연구는 다음의 단순 가정에 기반을 둔 예측기법을 제시하고자 한다. 먼저 가정들로서, 첫째는 조사된 절리는 조로 분류될 수 있으며, 각 조별 절리는 특정 형태의 간격을 갖는 패턴을 보인다. 두 번째는 주향이 터널의 진행방향과 유사한 절리(Fig. 1A)는 기하학적으로 추적이 용이한 절리들로서 다음막장으로의 연장성을 예측하기 쉬운 절리군이다. 이와 같은 절리군을 이하 진행방향군으로 기재하고자 한다. 한편 절리군의 주향이 터널의 진행방향을 직각에 가까운 각도로 교차하면서 경사값이 큰 절리군(Fig. 1B)은 선행될 막장에서의 분포유무를 예측하기가 어려운 절리군이다. 이와 같은 절리군을 이하 교차방향군으로 기재한다. 또한 단층, 절리, 이격된 층리 등 암반내부의 파쇄면 모두를 편의상 절리로 기재한다.

선진 굴착 영역에 분포할 절리를 예측하여 낙반이 가능한 블록을 예측하고자 할 경우, 선진영역의 절리분포

를 물리탐사나 시추와 같은 방법으로 정확히 파악하는 방법과(Phillips et al., 2014) 근처에 분포하는 조별 절리의 분포양상을 근거로 선진영역의 절리분포를 예측하는 방법을 고려할 수 있는데 본 연구는 후자의 방법을 제안하고자 한다. 모든 절리는 연장이 무한하지 않지만 진행방향군의 절리들은 같은 방향으로 연장된다는 보수적인 가정을 해볼 수 있겠다. 그러나 교차방향군의 절리들은 연장의 방향이 터널축을 교차하는 관계로 선진영역에서의 절리 존재유무(분포양상)를 예측하기가 어렵다. 그러므로 본 연구는 다음과 같은 가설로 교차방향군의 절리를 예측하는 방법을 제안하고자 한다.

Priest (1993)는 절리의 간격분포를 단일 절리군에서 수행할 때 단순 인접절리의 간격을 특정 스캔라인에서 수행하는 균간격(set spacing) 방법과 수직벡터방향의 균간격(normal set spacing)의 분포를 고려할 것을 제안하였다. 그리고 이들의 분포는 간격이 불규칙한 것(random distribution), 규칙적인 정규분포를 보이는 것(normal distribution)과 군집을 이루는 것(clustering distribution)으로 분류될 수 있음을 제시하였다. 본 연구와 같이 굴착의 선단부에 분포할 절리를 예측하기 위해서는 이와 같은 통계분석이 필연적 일 것이다. 그러나 이와 같은 선행 연구는 절리 분포 자체를 히스토그램화 한 분포양상에 관한 연구일 뿐, 3차원 공간에서 분산되어 있는 절리의 분포를 표현하고 있지는 않다. 그러므로 이러한 분포 연구의 결과는 절리의 분포양상을 모델화 하는데 유용할 수 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 3차원 공간에서 분포된 실 절리의 위치와 양상을 참고하여, 전방 영역에서의 절리분포를 예측하는데 활용하기에는 부적

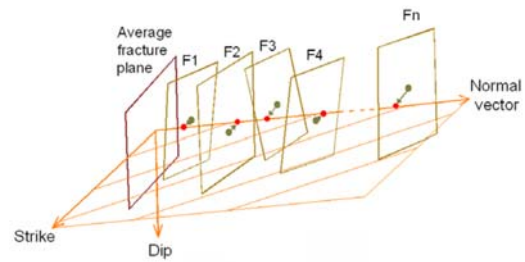


Fig. 2. Coordinate system used to calculate the spacing of joints in a set. The average strike and dip of joints in the set are assigned to two of the cartesian axes, and the vertical axis is the orientation normal to the plane. the spacing between adjacent fractures is measured along this axis.

합하다. 이에 본 연구에서는 아래의 예측알고리즘을 제시하고자 한다.

예측알고리즘

예측 알고리즘은 단일절리군을 대상으로 수행되며 Fig. 2와 같이 절리의 평균 분포방향에 수직인 방향에서 인접절리군의 거리를 측정 한 후 이를 Fig. 3(a)와 같은 누적 분포도에 표기하게 된다. 이 누적분포도의 수평축은 단순 절리의 순차적 배열을 등 간격으로 표기한 것이며, 수직축은 이 절리들 사이의 간격을 누적으로 표기한 것이다. 이 그래프는 수평축에서 인접절리의 분포간격을 등 간격으로 표기하므로 이들 절리사이의 간격분포 패턴이 그래프에 접기 된 점들의 패턴으로 반영되는 것이다. 즉 그래프의 경사가 큰 것은 절리 사이의 간격이 넓음을 의미하고 경사가 적은 것은 절리의 사이 간격이 좁은 것을 의미한다. 또한 절리의 간격분포가 규칙

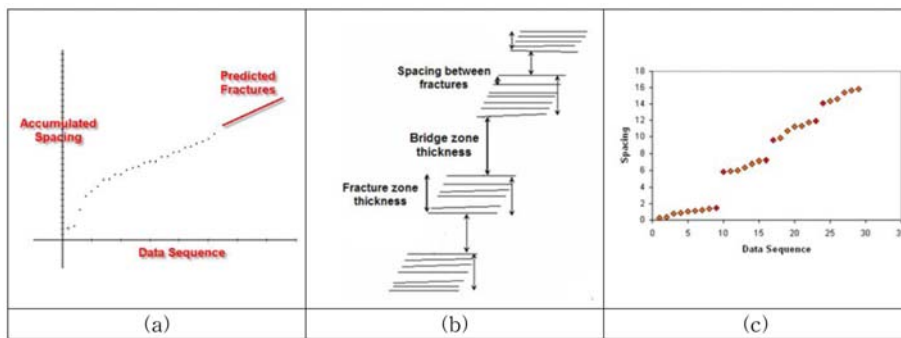


Fig. 3. Data of a fracture set plotted on an accumulated spacing graph. (a). Each fracture in the set is plotted as a point. Sequential fractures are assigned to equally spaced horizontal positions and the accumulated spacing between them is read from the vertical axis. This graph shows the distribution of the fractures in the set, and the extension of the distribution (“Predicted Fractures”) shows new fractures that are predicted to occur. (b) Schematic cross-section of a clustered fracture set, and (c) distribution of clustered fracture in a set, as shown in the accumulated spacing graph.

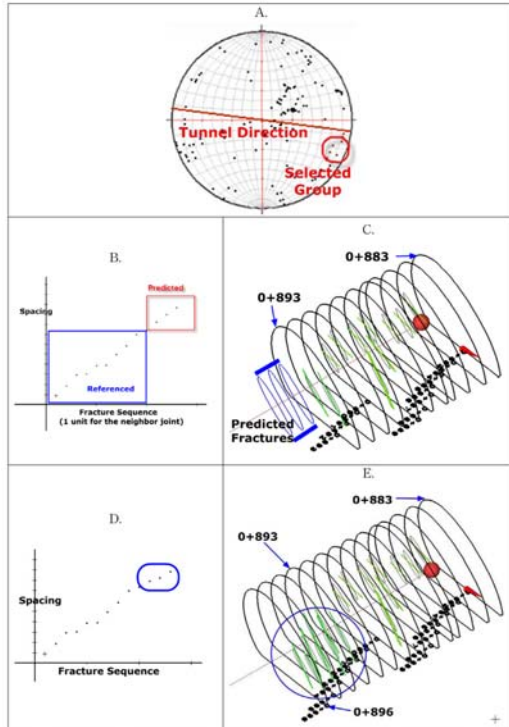


Fig. 4. Predicting fracture distribution within intact rock in an excavation space. A. Selecting a fracture set that is oriented at a high angle to the tunnel line. All fracture data within a 13-m interval (0+883 to 0+896) in the OO tunnel near NaePo New town are plotted and analyzed.

적이면 그래프가 매끄러운 선형을 보일 것이며 간격분포가 불규칙적이면 비선형 분포를 보일 것이다. 한편 Fig. 3(b)와 같이 절리의 분포가 균질형일 경우는 Fig. 3(c)와 같이 계단형의 그래프 형태를 보일 것이다. 그러므로 기존절리의 분포를 근거로 선행막장의 절리분포를 예측하는 과정은 터널내부에서 측정된 절리들로부터 교차방향군 절리의 3차원 분포를 Fig. 2와 같이 추출한 후 수직벡터를 계산하고 그 방향을 따라 순차적 간격을 계산하여 Fig. 3(a)와 같은 그래프를 작성하면 해당 절리군에 대한 분포패턴이 인지될 것이다. 이 후 선행막장에 분포할 절리의 예측은 그려진 그래프에 Fig. 3(a)와 같이 연장선(“Predicted Fracture”)을 입력하면, 연장선분의 경사로부터 인접절리의 간격을 계산해 낼 수 있다. 즉 수평축이 순차적으로 나열된 절리의 순열을 등간격으로 표시함으로써 이 경사 선분의 순열 등간격 지점에서 누적거리(수직축)를 읽어주면 이 자체가 인접절리의 사이 간격이 되는 것이다.

3. 현장적용사례

위 예측알고리즘의 현장적용을 위하여 내포신도시 인접부 OO터널에서 도로기선 0+883~0+896 구간의 모든 막장에서 절리를 측정 후 이를 이용한 분석을 수행하였다. 이 구간은 1m 간격으로 굴착이 진행되었으며, 분석은 먼저 10m 구간인 0+883~0+893 구역에서 측정된 절리의 분포를 분석하고, 선행 3m 구간(0+894~0+897)의 절리분포를 예측하여 그 결과를 이미 조사된 자료와 비교하는 방법으로 수행하였다.

Fig. 4A는 기 굴착 단면에서 조사된 모든 절리가 투영된 투영망으로, 투영망의 남동동-북서서 방향의 선분은 터널의 진행방향을 도식한 것이다. 이 자료 중 터널의 굴착방향과 고각으로 교차하며 경사의 방향이 큰 교차방향군 절리를 한 조 선택하였다(Fig. 4A, “Selected Group”). 선택 방법은 그룹의 중앙극점을 선택한 후 그 극점의 벡터와 20도 이내의 각도를 갖는 극점들을 선택하여 이들을 동일 절리그룹으로 설정하였다. 선택된 절리군의 절리를 10m 분석구간인 0+883~0+893 영역에서 취하여 누적분포도를 작성하고, 그 패턴에 준하여 3개의 예상절리를 입력한 결과가 Fig. 4B이며, 이 절리들의 3D 분포를 표기한 것이 Fig. 4C이다. 참고로 3D 분포도면에는 각 막장에서 조사된 절리의 중앙위치에 원이 그려져 있으며, 절리의 실제 분포형상이 사각형으로 표시되어 있다. 현재 도식된 그림(Fig. 4C)은 절리면 방향으로 회전되어 있어서 절리형상과 원의 형태가 뚜렷하지 않다.

예상절리와 실 조사절리의 비교를 위하여 앞 막장 3개가 포함된 0+894~0+897 영역의 절리를 이용하여 누적분포도(Fig. 4D)와 실 3D 공간에서 절리의 분포도를 작성 하였다(Fig. 4E). 누적분포도의 변화 양상에서 예측곡선(Fig. 4B)의 경우가 실제 조사자료로 작성된 누적분포도의(Fig. 4D) 경사보다 다소 높게 책정되었음을 알 수 있을 것이다. 이로 인하여 예측된 절리의 간격이 실제 조사된 절리의 간격보다는 조금 크게 설정되었음을 Fig. 4C와 Fig. 4E를 비교함으로써 알 수 있을 것이다.

4. 토 의

터널에서 굴착될 현 막장 앞부분의 절리분포를 예측하는 것은 매우 중요하지만 결코 쉽지 않은 숙제이기도 하다. 절리의 분포를 정확히 예측하려면 시추를 하거나 탄성과 탐사 등의 방법을 조합하여 정확한 절리의 분포

를 예측하는 방법(Phillips et al., 2014)을 사용하거나, 흔히 절리는 조를 형성하며 분포할뿐더러 그 분포양상이 규칙성이 있다는 그간의 관찰결과를 기반으로 예측해 볼 수 있겠다. 현장의 상황을 고려해 볼 때, 일반적으로 전자의 방법을 사용하는 것은 불가능하고 후자의 방법은 탐사에 소요되는 예산이나 시간적인 측면에서는 어렵지 않지만 자료를 3차원으로 수집하고 분석할 수 있는 방법에 다소 어려움이 있다. 이러한 관계로 기존 절리의 분포에 관한 통계적 연구는 스캔라인 이나 스캔 영역에 분포하는 절리의 간격분포 형태를 정규분포, 로그정규분포 혹은 역지수 분포 등으로 분류하고 이를 전반적인 RQD 분석연구 등에 활용하는 데에 집중되어 있으며, 본 연구와 같이 실 3D 공간에서 분포하는 절리의 위치 등을 통계적으로 분석하고 예측하고자 하는 시도는 전무한 실정이었다.

터널의 막장에서 조사된 지질구조와 RMR 분포를 3차원으로 데이터베이스화하고 공간 분포를 분석할 수 있는 Tunnel Mapper (<http://www.rockcloud.info>)와 같은 tool이 개발되면서 이와 같은 공간지질정보를 입력 분석할 수 있는 좋은 기회가 주어졌다. 본 연구는 이와 같은 3D 자료처리 기법을 이용한 전방 절리분포 예측 알고리즘의 하나로 단순 통계기법을 제시하였으며 그 적용 결과는 Fig. 4에서와 같이 크게 실망스럽지 않았다.

Priest (1993)가 지적하였듯이 절리 간격에 관한 연구는 모든 방향의 절리를 대상으로 하는 “total spacing”의 연구와 특정 절리군을 대상으로 하는 “set spacing” 연구로 구분할 수 있는데 현재까지는 대부분의 분포통계에 관한 연구는 전자의 경우에 집중되어 있으며 그 분포의 형상이 지수, 로그정규, 정규분포 등으로 구분되어 있음은 잘 알려져 있다. 이러한 연구들을 근거로 불규칙적 간격 분포인 지수형 분포구조가 RQD의 경험식을 계산하는데 사용되었음은 잘 알려져 있다. 한편 흔히 알려진 단일조의 절리 간격에 대한 배열을 연구한 연구들에서 이들은 대부분 로그정규분포를 따르고 있으며(Rouleau and Gale, 1985; Gale et al., 1991; Shapiro and Delpont, 1991; Mathab et al., 1995; Wines and Lilly, 2002; Peacock, 2006) 이 현상은 단일 조의 절리 분포는 군집형(clustering pattern)으로 분포함을 의미한다. 본 연구에서 조사된 절리군은 정규분포 형태를 보이고 있다. 그러나 아직 많은 절리군이 분석되지 않은 상태로 TunnelMapper와 같은 tool이 제공되면서 앞으로 이러한 분포패턴에 대한 정확한 관찰들이 이뤄질 수 있을 것으로 기대된다

본 연구에서는 10개의 막장에서 조사된 한 조의 절리 자료를 이용하여 3개의 선행막장에서 절리가 어떻게 분포할까를 예측하고 그 예측 결과를 실 조사결과와 비교하여 보았다. 이러한 비교는 예측의 결과를 검증한다는 측면에서 당연한 시도이다. 그러나 누적분포도의 성격을 이해하면 이러한 비교연구와 검증이 큰 의미가 없어짐을 알 수 있다. 절리군에서 인접절리간의 간격 분포를 누적분포도에 접기하면 간격이 좁을수록 경사가 낮아지고 등간격 분포를 할수록 접기된 자료가 직선형을 나타낸다. 한편 군집형으로 분포하는 절리군은 Fig. 3C와 같이 누적분포도의 그래프가 군집을 이루며 나타난다. 이러한 형상 중 그래프의 경사도와 직선도 및 군집도가 규칙적이면 규칙적일수록 절리의 분포는 규칙적이어서 예측 자체가 정확하다고 할 수 있다. 즉 특정영역에서 제작된 특정 절리군의 누적분포도가 매우 규칙적인 직선, 경사, 군집 형상을 보인다면 이 절리군은 어느 구간에서 측정된 자료를 기반으로 선행막장을 예측하더라도 정확한 예측이 가능하다는 의미이다. 그러므로 향후 본 연구에서 제시된 누적분포도를 이용한 절리예측의 검증은 현장자료들의 그래프가 얼마나 규칙적인 형태를 보이느냐를 관찰하는 것 만으로도 충분한 것이다.

5. 결 론

본 연구를 통하여, 터널의 시공과정에서 선행막장의 절리분포를 예측하기 위한 절리의 통계기법이 제시되었다. 제시된 기법은 다음과 같이 요약된다.

1. 기 조사된 막장에서 절리의 분포를 투영면에서 분석하여 절리의 주향이 터널 축 방향과 고각이며 절리의 경사가 높은 절리군을 대상으로 절리의 간격분포를 분석한다.
2. 분석기법은 동일한 조에 해당되는 절리의 평균 배열을 계산한 후, 이 배열의 주향, 경사, 및 수직벡터 방향을 3축으로 하는 측정공간을 설정한 후 절리를 수직 벡터축에 나열시켜 인접절리간의 간격을 측정한다.
3. 순차적으로 나열된 절리의 위치를 단위거리로 나누어 수평축(x축)에 나열하고 각 절리간의 거리를 누적하여 수직축(y축)의 거리량으로 표현된 누적분포도를 작성한다. 이 분포도에서 하나의 절리는 하나의 점으로 접기되며, 점들의 군집이 보이는 패턴은 그 절리군의 간격분포패턴이 된다.
4. 누적분포도에서 점들이 만드는 선의 형상이 직선에 가까우면 절리간격이 등분포를 보이는 것이며 직선의 경

사가 낮으면 인접절리의 사이간격이 좁은 것이다. 한편 점들이 군집을 이뤄 선분의 형태를 보이면 절리의 패턴이 군집형임을 의미한다.

5. 누적분포도의 현장적용 결과, 동일절리군에서 예측된 선행 막장의 절리들은 간격이 다소의 차이를 보일 수는 있으나 적절한 위치에 예측되었다. 본 연구에서는 10개의 조사된 막장에서 측정된 절리자료를 이용하여 3개의 선행막장 자료를 예측하여 그 결과를 비교하였다. 그러나 누적분포도의 패턴 그 자체가 절리 분포의 규칙성을 의미하는 것으로, 향후 누적분포도의 규칙성에 대한 세심한 관찰이 제안되었다.

6. 터널에서 조사된 절리자료의 3차원 분포를 전산화하고 3차원 공간에서 본 연구에서 제시된 방법으로 분석할 수 있는 s/w TunnelMapper가 소개되었다(<http://www.rockcloud.info>).

References

- Ben-Zion, Y. and Sammis, C.G., 2003, Characterization of Fault Zone, *Pure Applied Geophysics*, 160, 677-715.
- Chopra, S., 2002, Coherence cube and beyond, *First Break*, 20, 27-33.
- Chopra, S. and Marfurt, K. J., 2007, Volumetric curvature attributes for fault/fracture characterization, *First Break*, 25, 35-46.
- Dengliang, G., 2013, Integrating 3D seismic curvature and curvature gradient attributes for fracture characterization: Methodologies and interpretational implications, *Geophysics*, 78, 21-31.
- Einstein, H. H. and Baecher, G. B., 1983, Probabilistic and statistical methods in engineering geology: specific methods and examples. Part : Exploration, *Rock Mech. Rock Eng.* 16, 39-72.
- Gale, J. E., Schaefer, R. A., Carpenter, A. B., and Herbert, A., 1991, Collection, analysis and integration of discrete fracture data from the monterey formation for fractured reservoir simulations, Paper SPE 22741, Presented at the 66th Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, Oct., 6-9.
- Hudson, J. D. and Priest, S. D., 1979, Discontinuities and rock mass geometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16, 339-362.
- Maerten, F., 2010, Geomechanics to solve geological structure issues: forward, inverse and restoration modelling, PhD Thesis, Univ. of Montpellier II, Montpellier, France, 450p.
- Mathab, M. A., Xu, S., Grasso, P., and Kendorski, F. S., 1995, Use of curved scanlines and boreholes, *Journal of Structural Geology*, 28, 353-361.
- Neves, F. A., Zahrani, M. S., and Bremkamp, S. W., 2004, Detecting of potential fractures and small fractures using seismic attributes, *The Leading Edge*, 23, 903-906.
- Peacock, D. C. P., 2006, Prediction variability in joint frequencies from boreholes, *Journal of Structural Geology*, 28, 353-361.
- Phillips, H., Joonekindt, J. P., and Maerten, L., 2014, Natural fracture prediction for discrete fracture modelling, 76th EAGE Conference & Exhibition 2014, Amsterdam, 16-19.
- Priest, S. D., 1993, *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman & Hall, London, 473p.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1976, Discontinuity spacings in rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13, 135-148.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18, 183-197.
- Questiaux, J. M., Couples, G. D., and Ruby, N., 2010, Fractured reservoirs with fracture corridors, *Geophysical Prospecting*, 58, 279-295.
- Rives, T., Razack, M., Petit, J. P., and Rawnsley, K. D., 1992, Joint spacing: analogue and numerical simulations, *Journal of Structural Geology*, 14, 925-937.
- Rockcloud, 2013, Surface Mapper, Retrieved from <http://www.rockcloud.info>.
- Rouleau, A. and Gale, L. E., 1985, Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 22, 353-367.
- Shapiro, A. and Delpont, J. L., 1991, Statistical analysis of jointed rock data, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13(5), 375-382.
- Wallis, P. F. and King, M. S., 1980, Discontinuity spacings in a crystalline rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 17, 63-66.
- Wines, D. R. and Lilly, P. A., 2002, Measurement and analysis of rock mass discontinuity spacing and frequency in part of the Fimiston Open Pit operation in Kalgoorlie, Western Australia: A case study. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39, 589-602.
- Wu, H. and Pollard, D. D., 1995, An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness, *Journal of Structural Geology*, 17(6), 887-905.

황상기

배재대학교 건설환경철도공학과

대전시 서구 연자1길 14번지

Tel: 042-520-5628

E-mail: sghmap@pcu.ac.kr