

LIDAR와 Split-FX 소프트웨어를 이용한 암반 절리면의 자동추출과 절리의 특성 분석

김치환^{1)*}, John Kemeny²⁾

Automatic Extraction of Fractures and Their Characteristics in Rock Masses by LIDAR System and the Split-FX Software

Kim Cheehwan, John Kemeny

Abstract Site characterization for structural stability in rock masses mainly involves the collection of joint property data, and in the current practice, much of this data is collected by hand directly at exposed slopes and outcrops. There are many issues with the collection of this data in the field, including issues of safety, slope access, field time, lack of data quantity, reusability of data and human bias. It is shown that information on joint orientation, spacing and roughness in rock masses, can be automatically extracted from LIDAR (light detection and ranging) point clouds using the currently available Split-FX point cloud processing software, thereby reducing processing time, safety and human bias issues.

Key words LIDAR (Light Detection and Ranging), Automatic rock joint extraction, Joint orientation, Joint spacing and length, Joint roughness

초 록 암반 내 구조물을 시공하는 경우 역학적 안정성을 평가하기 위하여 암반의 특성을 조사한다. 이 경우 암반의 특성은 주로 암반 내 절리의 특성에 의하여 좌우된다. 지금까지는 암반 내 절리의 특성을 조사하기 위하여 암반이 노출된 사면이나 노두에 접근하고 육안으로 직접 관찰하였다. 이때 급사면과 같은 곳에서 접근의 문제, 작업의 안전 문제, 많은 시간이 걸리는 문제, 조사시간에 비하여 얻은 정보량의 부족, 정보의 재현 문제, 측정 오차 문제 등의 제한이 있었다. 따라서 이와 같은 문제를 개선하기 위하여 LIDAR (light detection and ranging)로 암반을 스캔하여 얻은 포인트 클라우드(point cloud)를 Split-FX 소프트웨어로 처리한 결과 절리의 방향과 간격 및 절리면의 거칠기 등 절리의 특성을 정확하고 효율적으로 분석할 수 있었다.

핵심어 라이다 스캔, 절리면 자동추출, 절리의 방향, 절리의 간격과 길이, 절리면의 거칠기

1. 서론

암반은 무결암과 이를 분리하고 있는 절리로 구성되어 있고 암반 사면이나 터널을 시공하는 경우 암반의 절리특성에 따라 사면이나 터널의 역학적 안정성이 달라진다. 특히 암반 사면이나 지표로부터 터널까지의 심도가 얇은 암반에서는 절리의 강도와 변형계수가 무결

암과 비교할 때 현저히 작기 때문에 암반 구조물의 큰 변형과 불안정은 절리의 변형 때문에 발생하는 것이 일반적이다. 즉 암반의 역학적 특성은 암반 내 절리면의 특성에 의해서 결정된다. 따라서 사면이나 터널 등 암반구조물의 설계나 시공을 안전하고 효율적으로 수행하기 위해 암반 내 절리의 특성을 충분히 파악하는 것이 중요하다.

암반 내 절리의 특성은 절리면의 방향, 절리길이, 절리간격, 절리면의 거칠기, 절리의 연장성, 절리면 사이의 틈 및 충전물질 등으로 구분할 수 있고 암반 구조물을 시공할 현장의 암반을 육안 조사 등을 통하여 결정할 수 있다. 보통 수준의 전통적인 암반절리 조사에서는 클리노컴파스(clinocompass)를 이용하여 육안 상으

¹⁾ 우석대학교 토목공학과

²⁾ 미국 아리조나 주립대학 자원지질공학과 교수

* 교신저자 : kimcheen@korea.com

접수일 : 2008년 12월 18일

심사 완료일 : 2009년 2월 13일

계재 확정일 : 2009년 2월 17일

로 보아 가장 뚜렷한 절리군의 방향을 측정하고 기타의 암반공학적 요소는 정성적으로 기록한다.

최근에는 더 많은 암반공학적 정보를 체계적으로 얻기 위하여 조사선 조사법(scanline method)과 조사창 조사법(window method)을 이용하고 있다(Priest, 1993). 두 방법 중 조사선법은 절리가 있는 암반에 줄자 등 조사선을 설치하고 조사선과 절리가 교차하는 곳에서 개개 절리면의 방향과 간격, 절리의 길이, 절리면의 거칠기, 절리면의 강도 등을 조사하는 방법이다. 따라서 각각의 절리 특성을 파악할 수 있는 장점이 있다. 이에 비하여 조사창법은 조사대상의 지역을 가상의 격자모양으로 분할하여 각각의 격자 내 영역을 조사창으로 가정한다. 각 조사창에서 암반의 절리특성을 평균적으로 정하는 방법이다. 조사창법은 조사선법에 비하여 조사에 시간이 덜 걸리고, 조사선법은 조사대상 절벽 등에 직접 접촉하여 조사를 수행해야 하나 조사창법은 조사대상 암반에 접근이 어려운 경우에 유리하다. 그러나 두 방법 모두 암반의 절리를 체계적으로 조사할 수 있지만 현장에서 실제 이용함에는 여러 가지 불편한 점이 있다. 첫째는 조사선법과 조사창법 모두 절리의 특성 조사에 많은 시간이 필요하다. 조사선법을 적용할 때 조사대상 영역을 답사하면서 조사선을 설치하고 조사선과 교차한 각각의 절리에 대해 클리노컴파스로 방향을 측정하고 간격과 연장성을 기록하는 것 등을 야외현장에서 작업하는 것이 번거롭다. 조사창법에서도 모든 조사창에 접근하기 위해 움직이는 시간이 많이 필요하다. 특히 급경사 지형이거나 지형변화가 심한 경우에 조사에 더 많은 시간이 필요하다. 둘째는 조사영역이 제한된다. 예를 들면 조사선법에서 작업의 안전관계로 조사자가 절벽 등을 올라가기 보다는 절벽의 하단에 조사선을 설치하고 조사를 수행하게 된다. 또 조사창법에서도 높은 절벽을 올라가 작업하기는 어렵다. 셋째는 조사한 정보의 양이 적다. 조사선법에서는 조사선과 절리가 교차하는 점에서만 절리 관련 정보를 얻게 되고 조사창법에서는 각 조사창에서 평균적인 절리특성을 조사하기 때문이다. 넷째는 이미지 정보가 빈약하고 재분석할 수 있는 정보로 구축이 어렵다. 조사 대상지를 전체적으로 혹은 국부적으로 디지털 사진 등 이미지를 보여주면서 정보화 될 수 있도록 하려면 별도의 컴퓨터 작업에 시간이 많이 걸린다. 또 조사가 끝나고 재분석이 필요할 때 조사선의 위치가 어디였는지 등을 정확히 알 수 없기 때문에 정보의 재생과 재분석이 어렵다. 다섯째는 오차를 가지고 있다. 조사선법이나 조사창법에서 절리면의 방향은 클리노컴파스를 사용하여 측정한다. 그런데 절리면은 완전한 평면이 아니므로 절리면이 크고 굴곡이 있

는 경우 절리면 중 클리노컴파스를 놓는 위치에 따라 측정되는 절리의 방향이 달라지게 된다(Herda, 1999).

이와 같은 여러 문제를 개선하기 위해서 디지털사진, 라이더(LIDAR, light detection and ranging) 스캔 등 디지털 기술을 도입하여 암반의 절리특성을 분석하려는 연구가 진행되고 있다. 라이더는 3차원 레이저 스캔이라고도 한다. 이러한 디지털 방법을 이용한 암반 절리 조사는 신속하게 많은 정보를 얻을 수 있고, 암반 사면이나 노두를 직접 접촉하지 않고 원격에서 조사가 가능하며, 정보의 저장과 재분석이 용이하므로 조사선법이나 조사창법의 불편을 개선할 수 있는 장점이 있다. 즉 전체 암반사면이나 노두에 나타난 절리 관련 정보를 원격 지동으로 신속하게 얻을 수 있다. 디지털 암반 절리 조사 방법을 구분하면 디지털 사진을 이용한 연구(Kemeny et al., 2003; Pringle et al., 2004)와 라이더를 이용한 연구(Kemeny et al., 2006a; Kemeny et al., 2006b; Kemeny et al., 2006c; Pringle et al., 2004; Mah et al., 2008; Matt et al., 2008; Bäcktröm et al., 2008)가 있다. 국내에서도 사진측량학을 이용한 절리 조사방법의 연구(한정훈 등, 2007; 류동우 등, 2000)와 3차원 레이저를 이용하여 암반 절리를 조사하는 연구(박의섭 등, 2008)가 보고되었다. 또 토탈스테이션(total station)을 사용하여 암반 절리의 방향을 측정한 연구(Feng et al., 2001)에서도 클리노컴파스를 사용하지 않는 비 접촉식으로 절리의 방향을 측정할 수 있고 디지털 사진도 저장할 수 있다(Pringle et al., 2004).

디지털 사진 방법과 라이더 스캔 방법을 비교하면 두 방법 모두 암반사면이나 노두에 대한 3차원 좌표값을 얻을 수 있고 측정에서 자료처리까지 소요되는 시간도 큰 차이가 없으나 디지털 사진으로부터 3차원 좌표를 만드는 과정이 복잡하다. 반면에 라이더에서는 3차원 좌표값으로 스캔되므로 별도의 처리과정이 필요하지 않은 장점이 있다. 라이더의 스캔결과를 레이저가 투사된 점을 3차원 좌표값으로 표시한 것으로 투사간격에 따라 수백만 개 이상의 점에서 좌표값이 측정된다. 수많은 점이 모여 구름처럼 보이기 때문에 포인트 클라우드(point cloud)라고 불리운다. 이 포인트 클라우드로부터 암반 내 절리의 방향, 길이, 간격 등을 구할 수 있다. 또한 고해상도의 천연색 디지털 사진기로 레이저로 투사한 사면을 촬영한다면 그 영상을 포인트 클라우드에 덧입혀 추가 분석을 할 수도 있다.

이번 연구에서는 암반 사면을 라이더로 스캔하여 포인트 클라우드를 저장한 다음 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어인 Split-FX를 사용하여 암반 내 절리의 특성 중 절리군의 방향, 절리의 간격과 길이, 절리면의 거

철거를 분석하였다. 이 중 절리의 방향과 간격 및 길이는 미국 아리조나주 투산 시 레몬산 내 암반 사면을 대상으로 라이다로 스캔한 결과를 분석하여 구하였다. 라이다로 스캔하면 각각의 절리면에 대해 방향 뿐만 아니라 그 크기, 즉 절리면의 넓이를 측정할 수 있으므로 스테레오네트(stereonet)에 표시할 때 극점의 크기를 절리면의 크기에 비례하도록 하였다. 절리의 간격과 길이는 포인트 클라우드에 디지털 사진의 영상을 덧입혀서 분석하였다. 또 절리면의 거칠기는 미국 몬태나 주 노친광의 암반 사면을 스캔하여 구하였다. 즉 라이다로 스캔한 포인트 클라우드로부터 절리면의 거칠기에 따른 팽창각과 절리면의 거칠기계수(JRC, joint roughness coefficient)를 구한 것이다. 또 암반 내 절리군의 방향과 절리의 간격 및 절리면의 거칠기를 도출해 내기 전에 라이다 스캔과 포인트 클라우드의 저장 및 이를 분석 처리하는 과정이 있다. 이 과정으로 라이다 스캔 후 포인트 클라우드로부터 삼각면 연결망 등을 생성하는 과정 등은 미국 콜로라도주에 있는 암반 사면을 스캔한 사례를 이용해서 서술하였다. 이와 관련하여 본 논문의 모든 그림은 미국교통부 결과 보고서(Kemeny et al., 2008)를 인용한 것이다.

2. 라이다 장비와 소프트웨어

2.1. 라이다 장비

라이다 또는 3차원 레이저 스캐닝은 조사 대상 암반을 향해 레이저를 투사해서 반사된 레이저를 받아 반사점까지의 거리를 구하는 원리를 이용한다. 대상 암반 전체를 볼과 수분 내에 좁은 간격으로 스캔하며 그 결과로 수백만 개의 3차원 좌표값도 얻을 수 있다. 라이다 장비는 거리를 계산하는 방법에 따라 time-of-flight와 phase-shift 형식의 장비로 구분할 수 있다. time-of-flight 형식은 레이저를 투사하여 반사점까지 도달하는데 걸린 시간을 먼저 계산하고 반사점까지의 거리는 빛의 속도와 시간을 곱하여 구한다. 또 phase-shift 형식은 레이저를 일정한 주기의 파형으로 투사했을 때 반사점에서 반사된 레이저의 파형은 위상이 변화하므로, 위상변화와 발진 주파수로부터 시간을 구하고 빛의 속도를 곱하여 투사점과 반사점 사이의 거리를 계산할 수 있다. 두 형식의 장비를 비교할 때 time-of-flight 장비는 phase-shift 장비에 비하여 먼 거리의 대상을 스캔하는데 유리하기 때문에 원거리 대규모 암반사면이나 노두의 스캔에 더 적합하다. 이번 연구에서는 먼 거리에서 암반이나 노두를 대상으로 절리의 특성을 분석하는 것이므로 time-of-flight 종류의 라이다 장비 중 하나를 선택하였다. time

-of-flight 라이다 장비도 여러 종류의 제품이 있으나 Optech ILRIS-3D를 사용하였다. Optech ILRIS-3D의 사양을 보면, 투사되는 레이저 빛의 파장은 1550 nm, 최소측정거리 3 m, 최대측정거리 1500 m (80% reflectivity), 1초당 측정회수 2500 측정, 100 m 거리에서 레이저 빛의 직경 29 mm, 100 m 거리에서 거리의 정밀도 8 mm, 각의 정밀도 0.00115 degree이다.

2.2. 포인트 클라우드 분석 소프트웨어

투사한 레이저 빛이 암반사면에서 반사되어 돌아오면 거리를 계산하고 이를 3차원 좌표로 저장한다. 이 과정은 1초당 수 천회 반복된다. 따라서 스캔 작업 중 많은 양의 측정자료가 얻어지고 저장되는데 이를 포인트 클라우드라고 한다. 이를 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어로 분석하여 암반 내 여러 절리 특성을 파악할 수 있다. 라이다 장비 제조사들은 자체장비에 맞춘 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어를 가지고 있고 기타의 포인트 클라우드 처리 전용 소프트웨어도 여러 가지 있다. 대부분의 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어는 기계설계, 건축설계 등에 활용할 목적으로 만들었다. 그 중 암반공학적인 특성을 고려한 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어로 Split-FX가 있다. Split-FX 소프트웨어는 포인트 클라우드에서 암반 절리면을 자동으로 추출해 내고 그 절리면의 방향, 절리면의 넓이와 형상, 절리면의 거칠기를 분석할 수 있다. 추출된 절리면을 방향에 따라 절리군으로 자동 분류할 수 있고 피셔상수(fisher constant) 등 절리특성 통계값을 계산하는 기능이 있으며 자동으로 인식 분류된 절리면을 스테레오네트(stereonet)로 출력할 수 있다. 또 이미지처리(image processing) 기능으로 포인트 클라우드에서 또는 포인트 클라우드와 디지털 사진을 겹친 후 절리면의 경계 또는 절리를 따라 선을 그리면 절리의 간격과 길이, 방향 등을 추가로 계산할 수 있다. 또 다른 기능으로 만약 동일한 사면에 대해 서로 다른 시간에 라이다로 스캔하였다면 이 두 개의 포인트 클라우드 자료를 비교하여 봉락되거나 이동한 암괴의 위치와 크기 및 이동속도 등 시간에 경과에 따라 발생한 암반 사면의 변화도 알 수 있다. 이와 같이 암반 절리면의 특성을 라이다와 Split-FX 소프트웨어로 처리하여 구할 수 있으므로 RMR이나 Q와 같이 암반을 공학적으로 분류하는데 필요한 절리 관련 인자값을 결정하는데도 도움이 될 것이다.

3. 라이다를 이용한 절리의 특성 분석

본 연구에서는 암반 사면을 라이다로 스캔하여 얻는

포인트 클라우드를 Split-FX 소프트웨어로 처리하여 절리의 방향, 길이, 간격 및 거칠기를 분석하였다. 조사대상 암반 사면은 미국 내의 3개 주에서 선정하였다. 이 들 중 라이다 스캔과 포인트 클라우드의 저장, 포인트 클라 우드로부터 삼각면 연결망 등을 분석하는 과정은 미국 콜로라도주에 있는 암반 사면을 스캔한 사례를 이용하였 다. 암반 내 여러 가지 절리의 특성 중 절리의 방향과 간 격 및 길이는 미국 아리조나주 투산 시에 있는 레몬산의 암반 사면을 스캔하고 그 결과를 분석한 것이다. 또 미국 몬태나 주 노천광의 암반 사면을 라이다로 스캔한 포인 트 클라우드로부터 절리면의 거친 정도에 따른 절리면 사이의 팽창각과 절리면의 거칠기계수를 구하였다.

3.1. 절리 특성 분석의 절차

Figure 1은 라이다와 Split-Fx를 사용하여 절리면에 대한 정보를 분석하는 일반적인 절차를 보인 것이다. Figure 1a는 라이다로 스캔한 미국 콜로라도의 암반사 면을 사진으로 보인 것이다. 분석 절차 중 첫 번째 순서 는 암반사면을 라이다로 스캔하여 포인트 클라우드를 생성하고 저장한다. 다음 단계는 포인트 클라우드부 터 스캐닝한 면을 작은 크기의 평면요소로 나누고 그물 처럼 연결망을 생성하는 것이다. 이때 요소의 모양은 삼각형이고 요소망의 생성과정에서 레이저의 진행을 막았던 방해물, 예를 들면 지나가는 차량, 나뭇가지 등 으로 발생한 자료를 걸러 제거 한다(Virtual Geomatics,



Figure 1a. Field site that was scanned using ground-based LIDAR

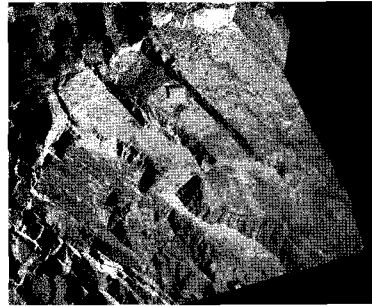


Figure 1b. Point cloud for the field site shown in Figure 1a

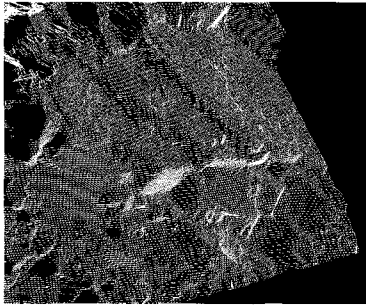


Figure 1c. Triangulated mesh for point cloud shown in Figure 1b

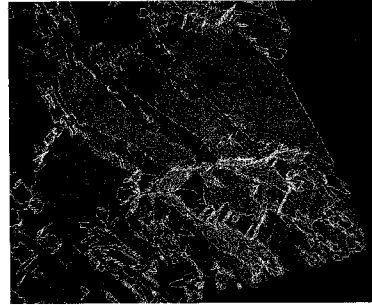
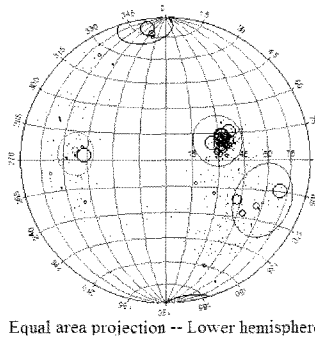


Figure 1d. Automatic delineation of fractures for the point cloud in Figure 1b



Equal area projection -- Lower hemisphere
Figure 1e. Stereonet plot of joints from Figure 1d

2008; Pfeifer, 2004). Figure 1b는 포인트 클라우드이고 Figure 1c는 포인트 클라우드로부터 생성한 요소망을 보인 것이다. 다음 단계는 삼각면 들로 구성된 요소망에서 절리면을 찾아내는 것이다. 절리면은 여러 개의 패치(patch)로 구성될 수 있다. 특정 삼각형 요소와 그 주변의 여러 삼각형 요소가 같은 평면 상에 있는 것을 패치라고 한다. 패치의 경계를 구하기 위하여 하나의 삼각면을 선택하여 수직벡터를 계산하고 그 주변에 있는 삼각면들의 수직벡터와 방향을 비교하여 그 차이가 주어진 허용범위 내에 있을 때 이를 하나의 패치로 결정하게 된다. 패치 여부를 결정할 때 필요한 삼각면의 방향 차이에 대한 허용범위는 사용자가 정할 수 있다. Figure 1d는 요소망으로부터 추출한 패치를 보인 것이다. Figure 1d에서는 삼각면 요소가 최소 5개 서로 밀집되어 있고 각 삼각형 요소의 방향차이에 대한 허용범위를 10도로 하였다. 패치들의 윤곽은 노랑실선으로 표시하였다. 일단 패치를 찾으면 패치의 방향을 스테레오네트 상에 절리로 표시할 수 있다. 스테레오네트에서 각각의 절리는 극점으로 표시되는데 절리의 크기에 따라 점의 크기도 비례하도록 하였다. 절리면의 방향과 크기를 동시에 나타내므로 암반 공학적으로 중요한 큰 절리면의 방향을 파악할 수 있도록 하였다. 즉 면적이 큰 절리는 역학적으로 중요한 절리이고 작은 면적의 절리는 우연히 생긴 평편한 표면일 가능성이 크므로 스테레오네트 상에 극점으로 표시할 때 절리의 크기에 따라 점의 크기도 다르게 나타낸 것이다. 이에 따라 Figure 1e는 Figure 1d의 절리를 스테레오네트 상에 표시되 절리의 크기에 따라 점의 크기도 다르게 한 것이다. Figure 1e를 보면 4개의 절리군이 표시되어 있다. 일단 절리를 분석해 내면 각 절리군에 대한 통계적 특성도 계산할 수 있다.

이와 같은 과정에 따라 분석할 때 필요한 작업시간을 보면 포인트 클라우드로부터 절리군을 추출하고 스테레오네트에 절리군을 표시하는데 까지 한 시간 이내에 처리할 수 있었다. Split-FX의 또 다른 특징은 스테레오 상의 정보와 포인트 클라우드 속의 정보가 서로 연결되어 있어서 스테레오 상에서 점으로 표시된 특정한 절리를 선택하면 포인트 클라우드에서 그 위치와 분포를 알 수 있다. 그러므로 컴퓨터 상에서 스테레오 화면과 포인트 클라우드 화면을 오가면서 중요한 것으로 판단한 절리에 대해 그 형상과 크기 등을 더 정밀하게 분석할 수 있다. 또 포인트 클라우드로 자료가 저장되므로 추가 조사가 필요할 때에도 다시 현장을 답사하지 않고 재분석할 수 있다.

3.2. 절리면의 방향

Figure 2와 3은 Split-FX를 이용해서 라이다로 스캔한 자료로부터 절리군과 절리의 간격을 분석한 결과이다. 이 곳은 암반사면으로 미국 아리조나주 투산시에 있는 레본산을 올라가는 도로 중 8 마일 표시지점에 위치하고 있다. 대상이 되는 사면에 수직인 방향에서 스캔하였고 절리면의 크기와 절리의 방향을 Split-FX 소프트웨어를 사용하여 자동으로 분석하였다. 그 결과 Figure 2 중 오른쪽 하단의 검은색 스테레오네트에 보이는 것과 같이 측정된 약 1,000개의 절리면을 절리군에 따라 서로 다른 색으로 구분하였고 또 절리면의 크기에 따라 극점의 크기를 다르게 표시하였다. 또 Figure 2의 중앙 하단의 흰색 스테레오네트의 절리들은 전통적인 방법으로 사면에 올라 클리노컴파스를 절리면에 대고 방향을 측정한 결과이고 측정된 절리의 갯수는 약 50개이다. 이 두 개의 스테레오네트에서 보듯이 클리노컴파스로 측정한 절리의 방향과 라이다로 사면을 스캔한 후 Split-FX로 분석한 절리의 방향 등을 비교할 때 절리군의 수와 절리의 방향이 서로 일치하였다. 따라서 라이다 스캔과 Split-FX 소프트웨어로 분석한 절리군과 그 방향을 클리노컴파스와 같은 정확도로 구할 수 있었다.

클리노컴파스와 라이다 스캐닝 후 Split-FX소프트웨어로 절리를 측정하는 경우를 작업시간 등을 포함하여 비교하였다. 먼저 작업시간을 비교하면, 사면 현장을 걸으면서 클리노컴파스로 절리를 측정하는 데에는 약 4시간, 이를 컴퓨터에 입력하는데 약 0.5시간, 스테레오네트로 출력하는데 까지 약 0.5시간이 소요되어 총 소요시간은 약 5시간이었다. 반면에 라이다 스캐닝과 이를 분석하는 데 소요된 시간을 보면 장비설치와 장비의 방향측정에 약 0.5시간, 스캐닝에 약 0.25시간, 자료를 컴퓨터에 내려 받는데 약 0.25시간, Split-FX 소프트웨어

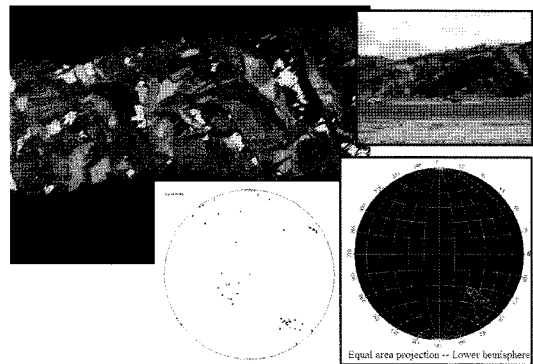


Figure 2. Scan on Mt. Lemmon Highway. Comparison of LIDAR generated data (black stereonet) with hand measurements (white stereonet)

에서 처리하고 스테레오네트로 출력하는데 까지 약 0.75 시간으로 총 2시간 미만이었다. 클리노컴파스로 답사하면서 절리의 방향을 측정할 경우와 비교할 때 라이다를 이용하면 소요시간은 약 절반 이하로 줄었지만 측정된 절리의 갯수는 약 20배 정도 많았다. 또 클리노컴파스로 절리를 측정할 경우에는 절리의 위치와 절리의 크기를 자료로 남기기 어렵고 측정된 절리의 개수가 부족하거나 또는 추가 조사가 필요할 경우에는 현장으로 다시 가서 조사를 해야만 한다. 더욱 어려운 경우는 지형이 험하고 사면에 대한 접근이 거의 불가능하면 클리노컴파스 작업을 할 수 없는 경우도 종종 있다. 그러나 라이다를 이용하여 스캔하고 이를 분석한 경우에는 원거리 비접촉조사가 가능하고, 짧은 시간에 많은 절리를 측정할 수 있고, 절리의 모양과 크기를 알 수 있으며, 스캐닝한 자료를 저장할 수 있으므로 필요 시 재분석하여 절리의 분포를 더 정밀하게 파악할 수 있는 장점이 있었다.

추가적인 분석 방법으로 라이다의 포인트 클라우드와 디지털 사진을 함께 분석하는 것이다. 라이다 스캔 결과인 포인트 클라우드와 디지털 사진을 함께 분석하면 레이더의 투사각에 따라 선으로 나타나는 절리도 분석할 수 있다. 라이다 스캔 중 투사된 레이저가 절리면에서 반사되는 횟수는 레이저의 해상도, 절리면의 크기, 절리면의 방향과 투사된 레이저 사이의 각도차이 등 여러 가지 요인에 따라 변할 수 있다. 만약 절리면의 방향이 투사된 레이저의 방향과 거의 평행하다면 그 절리면에서 레이저가 반사될 확률이 작아지고 따라서 절리의 갯수도 작게 분석될 수 있다. 어떤 경우에는 절리면 전체가 투사된 레이저에 노출되지 않고 숨겨진 상태일 수도 있다. 이때는 레이저 장비의 위치를 여러 곳으로 바꾸고 레이저의 투사각도를 조절하여 암반 사면을 스캔하여야 한다. 그러나 암반 내 절리 구조가 레이저 스캐닝에 노출되지 않은 상태일지라도 절리면의 일부 혹은 절리가 선모양으로 나타났다면 라이다 스캔과 함께 촬영한 디지털 사진을 포인트 클라우드에 겹쳐서 Split-FX 소프트웨어로 처리하면 절리면을 분석해 낼 수 있다. 이를 사진덧입힘(photo draping or texture mapping)이라고 한다(Blythe, 1999).

그림 Figure 3은 Figure 2에 나타난 현장과 같은 곳에서 레이저 스캔 포인트 클라우드에 사진을 덧입혀 Split-FX 소프트웨어로 절리면을 분석한 것을 보인 것이다. 이를 위하여 사진을 포인트 클라우드의 정확한 위치에 겹쳐야 하는데 먼저 사진과 포인트 클라우드 상에서 같은 위치가 되는 곳에 기준점을 설정하였다. 기준점이 많을수록 정확할 것이나 본 연구에서는 기준점을 3 개 설정하였다. Figure 3a와 3b는 각각 사진과 포

인트 클라우드 위에 설정한 기준점을 빨간색 점으로 보이고 있다. Figure 3c는 사진 위에서 작은 절리면이나 절리면은 보이지 않고 단지 선으로 보이는 절리선을 여섯 군데 표시한 것이다. 이 중 한 곳은 절리면의 일부만이 사진과 포인트 클라우드 상에서 볼 수 있지만, 나머지

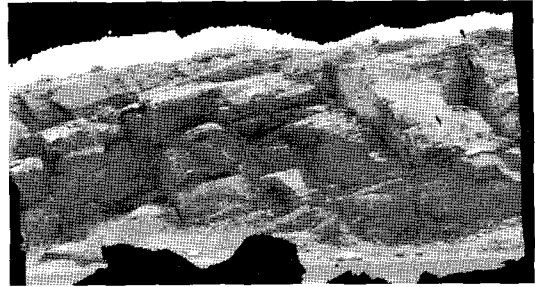


Figure 3a. Step 1 in photo draping procedure, insert pins on digital image



Figure 3b. Step 2 in photo draping procedure, align pins on point cloud to the same position as in digital image



Figure 3c. Step 3 in photo draping procedure, delineate fracture traces on the digital image



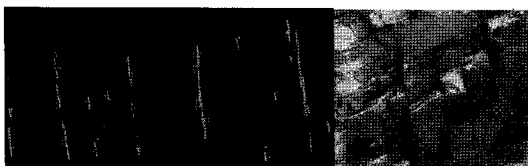
Figure 3d. Step 4 in photo draping procedure, three dimensional fracture orientations extracted from the traces

다섯 곳은 사진에서 절리선으로 보이거나 절리면의 방향을 포인트 클라우드 상에서는 알 수 없는 곳이다. Figure 3d는 사진과 포인트 클라우드를 겹쳐 절리선을 표시한 Figure 3c로부터 Split-FX를 사용해서 절리면을 분석한 결과이다.

이와 같이 포인트 클라우드와 디지털 사진을 겹쳐서 3차원 절리면을 찾아내는 방법은 단층처럼 대규모 단일 방향의 구조를 파악하는데 이용할 수 있다. 연약한 단층은 포인트 클라우드만으로는 3차원 절리로 분석되기 어려우나 디지털 사진으로는 판별하기가 비교적 쉽기 때문이다. 이 경우에는 단층의 위치를 사진 상에서 판별한 다음 단층의 방향은 디지털 사진과 포인트 클라우드를 겹쳐 분석하는 것이 효과적일 것이다.

3.3. 절리의 간격과 길이

절리의 간격과 길이도 디지털 사진 또는 포인트 클라우드 상에서 분석될 수 있다. Figure 4는 포인트 클라우드와 디지털 사진에서 절리의 길이와 간격을 구하는 과정을 보인 것이다. 디지털 사진에서 구한 절리의 간격 2 차원에서 얻은 겹보기 간격이므로 절리의 경사에 따라 보정하여야 실제 절리 간격을 구할 수 있다. 포인트 클라우드는 3 차원 자료이므로 절리의 주향에 수직인 방향으로 절리의 간격을 구할 수 있다. 절리의 윤곽 또는 경계선을 알 수 있으면 절리의 간격을 구할 수 있다. 자동으로 절리의 윤곽을 도출해 내는 것으로 모서리 감지(edge detector) 알고리즘이 있는데, 이미지 처리(image processing)기능의 일부이다(Gonzalez and Wintz, 1987). 암반 내 절리를 감지하기 위하여 모서리감지 기능의 알고리즘은 여러 연구자에 의해 보고되었고(Hadjigeorgiou et al., 2003; Kemeny et al., 2003) 본 연구에서 사용한 Split-FX 외에 여러 이미지 프로세싱 소프트웨어에서도 사용되고 있으나 다음과 같은 이유로 아직 사용하지 않았다. 첫째 이유는 Figure 4b에서 보인 것과 같이 여러 가지 작은 규모의 절리를 포함한 모든 불연속구조의 윤곽을 복잡하게 보여주므로 절리군에 따라 각각의 통계값을 구하기 위해서는 편집과정이 필요하다. 둘째는 노



(a) (b)

Figure 4. Information on joint length and spacing can be extracted from both a) point clouds and b) digital images

출된 암반의 이미지는 복잡하기 때문에 자동으로 절리의 윤곽을 감지하는 것이 완전하지 않다. 따라서 보정 편집이 필요하다. 셋째는 디지털 사진 상에서 절리면의 윤곽을 그리는 것이 복잡하지 않고 시간이 많이 소요되지 않기 때문에 자동 감지를 이용하지 않아도 불편이 거의 없다는 것이다. 예를 들면 Figure 4b와 같이 윤곽선을 그리는데 불과 몇 분 걸리지 않았다.

3.4. 절리면의 거칠기

암반 사면을 라이다로 스캔한 경우 절리면의 거칠기를 알 수 있는 여러 방법이 있다. 첫 번째 방법은 Figure 5와 같이 절리면을 작은 삼각형 형상으로 분할하고 각각의 삼각면에 대한 방향을 스테레오네트 상에 극점으로 표시한다. 그러면 스테레오네트 상에서 절리면의 대표방향을 중심으로 삼각면 요소의 방향을 표시한 극점들이 분산된 것을 알 수 있는데 이 분산된 값이 절리면의 팽창각이 된다. Patton (1966)이 톱니모양의 절리면을 이용하여 제안한 절리면의 팽창각은 절리면의 평균방향에 대해 톱니모양이 돌출된 각도를 의미하고 Figure 5의 스테레오네트 하단의 그림과 같다. 절리면의 팽창각은 절리면의 기본 마찰각에 더하여 절리면의 거칠 정도에 따라 추가되는 마찰각이므로(Goodman, 1989) 스테레오네트 그림에서 절리면의 평균방향과 그 절리면을 작은 삼각형으로 분할한 요소들과의 방향차이가 되는 것이다. Figure 5는 라이다로 스캔한 후 포인트 클라우드로부터 특정 절리면을 삼각형요소로 분할한 후 절리면의 팽창각을 구하는 과정을 보인 것이다.

Figure 6은 대규모 절리면의 거칠기를 위의 방법으로 분석한 예이고 위치는 미국 몬타나주의 노천광이다. Figure 6a를 보면 두 개의 대규모 절리면이 있고 각각의 절리면에서 팽창각을 분석하기 위해 작은 삼각형 요소면

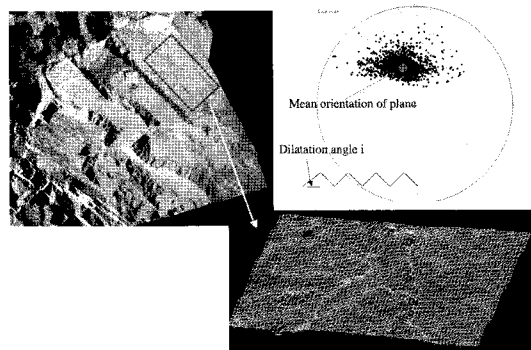


Figure 5. Analyzing joint roughness using LIDAR data, by making a triangulated mesh of a joint and plotting the pole for each triangle on a stereonet

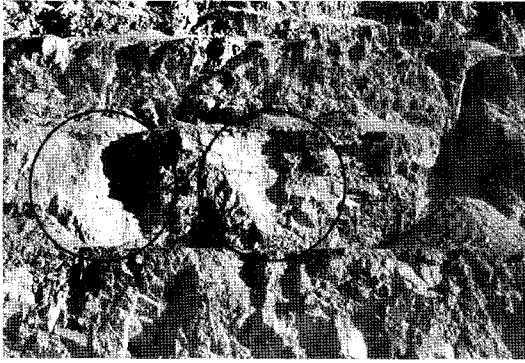


Figure 6a. Location of two large joint surface for determination of maximum dilatation angle using the method described in Figure 5

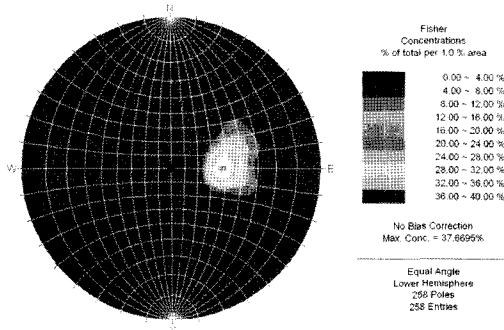


Figure 6b Contoured stereonet of poles of each mesh triangle in left fracture shown in Figure 6a

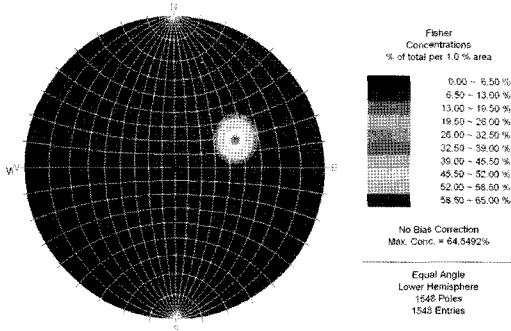


Figure 6c. Contoured stereonet of poles of each mesh triangle in right fracture shown in Figure 6a

을 극점으로 표시한 것은 Figure 6b, Figure 6c와 같다. 절리면의 대표방향에서 약 90%의 극점을 포함되도록 분산각을 결정할 경우 팽창각은 약 10-15도로 분석되었다.

라이다 스캔과 Split-FX 소프트웨어를 이용해서 절리면의 거칠기를 측정하는 또 하나의 방법은 절리면에 수직인 단면에서 절리면이 돌출된 방향의 좌표를 구한 후 Tse and Cruden (1979)가 제안한 Z_2 등 통계적 방법을

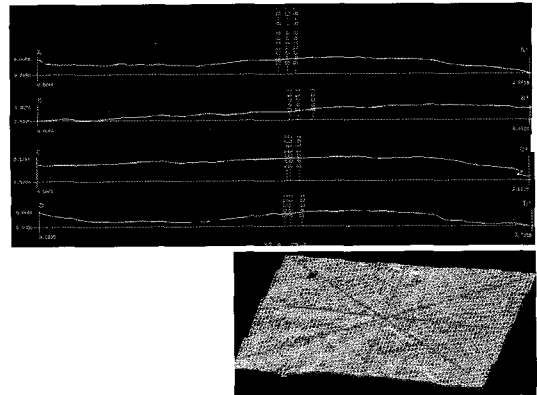


Figure 7. Analyzing joint roughness, by making topographic profiles of the joint in different directions, and processing the roughness profile to extract roughness parameters such as JRC

이용한 다음 식으로 절리면 거칠기 계수를 계산하는 것이다. 여기서 Z_2 는 단면상에서 돌출된 절리면의 평균변화율을 제공한다.

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2$$

Figure 7은 절리면의 단면을 보인 것인데 절리면의 돌출 높이는 라이다로 스캔한 후 포인트 클라우드로부터 삼각면 요소를 생성한 후 얻은 3차원 좌표값의 일부이다. 이와 같이 절리면의 돌출곡선을 이용하여 절리면의 거칠기를 구하는 방법으로 절리면 거칠기를 또 다른 연구보고가 있다(Haneberg, 2007).

4. 요약 및 결론

터널이나 암반 사면 등 암반 구조물의 역학적 안정성을 유지하기 위하여 암반의 강도, 변형특성 등을 파악해야 하는데 암반의 공학적 특성은 주로 암반 내 절리의 특성에 따라 달라지므로 절리의 특성인 절리의 방향, 절리의 간격, 절리의 길이, 절리면의 거칠기 등을 효율적이고 정확하게 조사하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 라이다로 암반 사면을 스캔하여 암반 표면에 대한 3차원 좌표를 얻은 후 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어로 암반 내 절리의 특성을 분석하였다.

그 결과 암반 내 절리군을 자동으로 추출할 수 있었고 절리의 방향은 현장에서 클리노컴파스로 측정된 절리의 방향과 잘 일치하였다. 라이다 스캔작업부터 절리군을 분석하여 스테레오네트로 표시하는 데까지 소요되는 시간을 현저히 줄일 수 있었고 측정된 절리면의 수효는 클리노컴파스를 사용하여 절리방향을 측정한 전

통적인 방법보다 훨씬 많으므로 통계적으로 신뢰도가 높을 것으로 판단되었다. 또 절리의 간격과 길이는 디지털 사진정보를 3차원 좌표인 포인트 클라우드 위에 덧입힌 후 사진에 나타난 절리선을 따라 선을 그리는 간단한 과정으로 분석할 수 있었다. 절리면의 거칠기는 포인트클라우드를 이용하여 절리면에 수직인 방향의 좌표값을 구하여 절리면 거칠기 계수를 구하거나, 절리면을 작은 삼각형 평면으로 분할한 후 스테레오 상에 극점으로 표시하고 절리면의 대표방향에 대한 극점의 분산값으로부터 절리면의 팽창각도 구할 수 있었다.

라이다를 적용하여 스캔한 정보는 컴퓨터 파일로 저장되므로 재생과 재분석이 가능하고 더 정밀한 분석이 추가로 필요할 때에 현장조사를 다시 수행해야 하는 번거로움을 줄일 수 있을 것이다. 또 공학적 암반분류법인 RMR, GSI, Q 방법을 활용할 때 여러 가지 절리 관련 인자값의 결정에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 우석대학교 안식년 연구지원과 다음과 같은 지원으로 수행되었음. This work was supported by National Science Foundation Grant CMMI 0653942 (USA).

참고문헌

1. 류동우, 이유리, 장운섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간 제10권, 329-343.:
2. 박의섭, 천대성, 정용복, 류창하, 선우춘, 최용근, 허승, 2007, 역분석공학기법을 이용한 불연속면 분석 프로그램 개발 터널과 지하공간 제17권 제3호, 165-174.:
3. 한정훈, 송재준, 2007, 입체사진측량기법의 암반절리조사에 대한 적용성 연구 터널과 지하공간 제17권 제2호, 139-151.:
4. Bäckström, A., Feng, Q., Lanaro, F., 2008, Improvement of fracture mapping efficiency by means of 3D-laser scanning, ARMA 08-106.:
5. Blythe, D. 1999. Advanced Graphics Programming Techniques Using OpenGL. Siggraph 1999, <http://www.opengl.org/resources/code/samples/sig99/advanced99/notes/notes.html>.:
6. Gonzalez, R. C. and P. Wintz. 1987. Digital image processing, 2 ed. Addison-Wesley, Boston.:Goodman, R.1989. Rock Mechanics, 2nd ed., Wiley.:
7. Hadjigeorgiou, J., Lemy, F., Co te', P., and X. Maldague. 2003. An Evaluation of Image Analysis Algorithms for Constructing Discontinuity Trace Maps Rock Mech. Rock Eng., 36(2), 163-179.:
8. Haneberg, W.C. 2007. Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner

- point clouds, Proceedings 1st Canada-U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, B.C., 27-31 May, 101-106.:
9. Herda, 1999, Strike standard deviation for shallow-dipping rock fracture sets. Rock Mechanics and Rock Engineering 32(4), 2451-255.:
10. Jamie Pringle, Andy Gardiner, Robin Westerman, 2004, Geology Today, Vol. 20, No. 2, March-April, 67-72.:
11. John Kemeny, Randy Post, 2003, Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces, Computer & Geoscience 29 (2003) 65-77.:
12. Kemeny, J., Norton, B. and K. Turner. 2006a. Rock Slope Stability Analysis Using Ground-Based LIDAR and Digital Image Processing, Felsbau - Rock and Soil Engineering, Nr. 3/06, 8-15.:
13. Kemeny, J., Turner, K. and B. Norton. 2006b. LIDAR for Rock Mass Characterization: Hardware, Software, Accuracy and Best-Practices, Proceedings of the Workshop on Laser and Photogrammetric Methods For Rock Mass Characterization: Exploring New Opportunities, Golden, CO.:
14. Kemeny, J., Donovan, J. and C. Rodríguez. 2006c. Application of Ground-Based LIDAR for Pre-Blast Rock Mass Characterization, Proceedings of Fragblast 8, the 8th International Conference on Fragmentation by Blasting, Santiago, Chile.:
15. Kemeny, J., Turner, K., 2008, Ground-Based LiDAR Rock Slope Mapping and Assessment, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Publication No. FHWA-CFL/TD-07-0xx. 2008, 7.:
16. Mah, J., Samson, C., McKinnon, S., Aikman, D., 2008, Triangulation Based 3D Laser Imaging for Underground Rock Mass Characterization: Impact of Operational Parameters, ARMA 08-249.:
17. Matt Lato, Mark S. Diederichs, D. Jean Hutchinson, Rob Harrap, 2008, Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses, Int. J. Rock Mech.&Min. Sci. doi:10.1016/j.ijrmmms.2008.04.007.:
18. Patton F.D. 1966. Multiple modes of shear failure in rock. In: Proc First Cong Int Soc Rock Mech, vol 1, Lisbon, p. 509-513.:
19. Pfeifer, N., Gorte, B., Oude Elberink, S. (2004): Influences of Vegetation on Laser Altimetry - Analysis and Correction Approaches. The International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part 8/W2, 283-287.:
20. Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall, London.:
21. Q.Feng, P.Sjögren, O. Spephansson, 2001, Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. Engineering Geology 59, 133-146.:
22. Tse, R. and D. M. Cruden. 1979. Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 16:303-307.:
23. Virtual Geomatics. 2008. <http://www.virtualgeomatics.com>.



김치환

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 063-290-1468

E-mail: kimcheen@korea.com

현재 우석대학교 토목공학과 교수



John Kemeny

1977 B.A. Geology and Mathematics,
University of California, Santa Barbara
1984년 M.Eng. Materials Science and
Mineral Engineering, University of Cali-
fornia, Berkeley

1986년 Ph.D. Materials Science and
Mineral Engineering, University of Cali-
fornia, Berkeley

Tel: 1-520-621-4448

E-mail: kemeny@email.arizona.edu

현재 미국 아리조나 주립대학 자원지질
공학과 교수