

LIDAR를 이용한 대규모 암반 절리면의 거칠기 측정

김치환^{1)*}, John Kemeny²⁾

Measurement of Joint Roughness in Large-Scale Rock Fracture Using LIDAR

Kim Cheehwan, John Kemeny

Abstract This is a study on large-scale rock joint roughness measurements using LIDAR (light detection and ranging) and the Split-FX point cloud processing software. The large-scale rock Joint Roughness Coefficient (JRC) is calculated using the maximum amplitude of joint asperities over the profile length on large-scale joint surfaces of rock. As the profile length increases, JRC decreases due to scale-effects of rock specimens and is non-stationary. Also JRC shows anisotropy depending on the profile direction. The profile direction is measured relative to either dip or strike of the large-scale joint.

Key words LIDAR, large-scale rock joint, joint roughness coefficient (JRC), scale-effect in JRC, anisotropy of JRC

초 록 대규모 암반 절리면의 거칠기를 구하는 여러 가지 방법이 있으나, 길이 10 cm의 절리를 Barton 등이 제안한 표준절리면곡선과 비교하여 절리면 거칠기계수 JRC (joint roughness coefficient)를 결정하고 대규모 절리의 길이에 따라 보정하는 것이 가장 일반적인데, 적합한 표준 절리면곡선을 선택할 때 측정자에 따라 달라지는 경우가 많다. 따라서 대규모 암반 절리면의 거칠기 JRC는 길이에 따른 보정 없이 직접 측정하는 것이 정확할 것이나 측정방법에 한계가 있다. 본 연구에서는 대규모 암반절리를 LIDAR (light detection and ranging)로 스캔하고 절리의 길이 L과 절리면 상의 돌출부(asperity) 높이의 진폭 a를 이용하여 대규모 암반 절리의 거칠기계수 JRC를 구하였다. 그 결과 대규모의 암반 절리면에서도 절리의 길이에 증가에 따라 거칠기계수 JRC가 감소하는 비 정상상태(non-stationary)의 치수효과와 거칠기 측정방향에 따라 절리면 거칠기계수 JRC가 다른 것을 확인하였다.

핵심어 라이다, 대규모 암반절리, 암반절리면 거칠기계수, 절리면 거칠기계수의 치수효과, 절리면 거칠기계수의 이방성

1. 서론

암반은 무결암과 이를 분리하고 있는 불연속면 또는 절리로 구성되어 있으므로(Goodman, 1989; Brady and Brown, 1994), 암반 내 절리의 특성을 파악하는 것이 암반의 역학적 거동과 수리지질학적 움직임을 분석하는데 중요하다(Nelson, 1985; Bieniawski, 1989). 암반 내 절리의 특성은 현장조사를 통하여 결정할 수 있으며, 조사해야할 특성으로는 절리의 방향, 절리의 간격과 길

이, 절리면의 거칠기, 절리의 연속성, 절리 내 충전상태 등이 있다(Priest, 1993). 이와 같은 여러 가지 절리의 특성 중 절리면의 거칠기를 파악하는 것도 중요하다. 절리면의 거칠기에 따라 암반의 역학적 거동과 수리지질적인 거동이 크게 달라지기 때문이다.

암반 내 절리면의 거칠기를 정량화하기 위하여 현재까지 여러 방법이 제안되어 있지만, 그 중에서 절리면 거칠기를 계수로 표시하는 방법(JRC, joint roughness coefficient), 통계적 방법, 프랙탈(fractal)방법이 주로 이용되고 있다. 이 방법들의 특징은 요약하면 다음과 같다. 암반 절리면 거칠기계수 JRC는 Barton (1973)이 제안하였는데 국제암반역학회(ISRM, International Society of Rock Mechanics)에서 잠정적인 표준방법(ISRM, 1978)으로 채택한 이후 엔지니어링 실무에서 많이 활용하고 있다.

이에 따르면 절리면 거칠기계수 JRC는 절리면에서 톱

¹⁾ 우석대학교 토목공학과

²⁾ 미국 아리조나 주립대학 자원지질공학과 교수

* 교신저자 : kimcheen@korea.com

접수일 : 2009년 1월 30일

심사 완료일 : 2009년 2월 3일

게재 확정일 : 2009년 2월 9일

니 모양으로 돌출된 형상곡선에 따라 0~1에서 18~20까지 10 단계로 나누어진 표준 절리면거칠기 곡선(standard joint profile)이 제시되어 있고, 이 곡선들과 실제 암반 절리면의 형상곡선을 시각적으로 비교한 후 가장 유사한 표준 절리면거칠기 곡선을 선택하면 절리면의 거칠기계수 JRC도 정해지게 된다. JRC를 구하는 또 다른 방법은 암반 절리면이 상하면으로 짝지어진 경우 상부 암석블럭을 밀거나 당기는 시험(push or pull test)으로 절리면의 거칠기 계수를 결정할 수 있고, 절리로 분리된 시료를 절리면이 수평인 상태에서 한쪽을 서서히 들어올리면서 상부 암석이 절리면에서 미끄러지기 시작하는 경사각으로부터 절리면의 거칠기를 결정할 수도 있다(tilt test). 그런데 가장 많이 사용되는 방법은, 표준 절리면거칠기 곡선과 실제 암반 절리면의 형상을 비교하여 절리면의 거칠기를 정량적으로 결정하는 것이나 표준 절리면거칠기 곡선 10 개로 실제 암반 절리면의 형상을 모두 나타낼 수 없기 때문에 측정자에 따라 가장 유사한 곡선이 주관적으로 결정되고 따라서 절리면 거칠기계수 JRC도 측정자에 따라 크게 다를 수 있다(Maerz et. al., 1990; Hsiung et. al., 1993; Kulatilake et. al., 1995; Beer et. al., 2002). 또 표준절리면 거칠기 곡선을 이용한 방법 외 push, pull 또는 tilt 시험으로 JRC를 구한 결과를 Hsiung 등(1993)이 비교하였는데, 그 결과에 따르면 이 두 실험으로 구한 JRC는 절리면 전단시험으로 구한 JRC값의 약 50% 정도에 불과한 것으로 나타났다. 그러므로 Barton이 제안한 10 cm길이의 거칠기곡선이나 기타 시험법을 사용하여 절리면의 거칠기계수 JRC를 구하는 것에는 한계가 있는 것을 알 수 있다.

암반 절리면의 거칠기를 구하는 두 번째 방법으로 여러 가지 통계법을 사용하여 JRC를 구하는 시도가 있었다(Wu et. al., 1978; Tse et. al., 1979; Krahn et. al., 1979; Dight et. al., 1981; Maerz et. al., 1990; Reeves et. al., 1990). 이 방법은 Barton이 제시한 표준 절리면거칠기 곡선을 통계적인 방법으로 표현하려는 것이 주를 이루고 있다. 이 들 가운데 Tse and Cruden (1979)의 연구 결과가 가장 많이 이용되고 있다. Tse and Cruden (1979)는 표준 절리면거칠기 곡선에서 수평방향의 길이 증가량을 작게할 때 증감하는 절리면 돌출높이를 이용하여 여러 통계변수값을 검토하였다. 여러 가지 통계값 중 절리면의 돌출면 기울기(asperity slope) Z_2 와 구조 함수(structure function) SF가 JRC값과의 상관성이 좋은 것으로 보고하였다. 그런데 Z_2 는 절리의 길이에 따라 변하는 치수효과(scale effect)가 있다. 또 대부분의 암반 절리에서 JRC 값은 절리의 길이에 따라 값이 달

라지는(non-stationary) 특징이 있는데, Z_2 는 절리의 길이가 특정 길이 보다 길어지면 JRC가 변하지 않는 조건(stationary)에서만 사용할 수 있다(Kulatilake et. al., 1995).

암반 절리면의 거칠기를 구하는 세 번째 방법으로 프랙탈을 이용한 연구가 있다. 이는 Mandelbrot (1993)가 프랙탈 기하학을 연구 보고한 이 후 이를 암반 절리면의 형상을 대상으로 응용한 것이다. 암반 절리면의 형상에 프랙탈 이론을 적용할 때의 장점은 절리의 길이가 변할 때 치수효과를 예측할 수 있다는 것이다. 프랙탈은 self-similar 또는 self-affine이 될 수 있다. 이 중 암반 절리면의 형상은 self-similar 프랙탈이라는 가정 하에 프랙탈 차원 D와 암반 절리면의 거칠기계수 JRC의 관계를 연구한 사례들이 있다(Carr et. al., 1989; Lee et. al., 1990; Wakabayashi et. al., 1992; Hsiung et. al., 1993). 그런데 Hsiung 등(1993)은 Carr 외 3개 연구그룹이 제시한 프랙탈 차원 D와 JRC의 관계식들을 이용하여 구한 JRC값들을 비교하였을 때 서로 간에 큰 차이가 나는 것을 보고하였다. 또 이 관계식들로 구한 JRC들은 Tse 등이 통계적 방법으로 구한 JRC와도 큰 차이를 보였다. 뿐만 아니라 절리면 전단시험으로부터 구한 JRC와 비교할 때 프랙탈로 구한 JRC값이 작게 평가되는 것으로 보고하였다. 따라서 암반 내의 절리가 self-similar 프랙탈이라는 조건 하에서 프랙탈 차원 D와 암반절리의 거칠기 계수 JRC의 관계를 제시한 식을 사용해서 JRC를 결정하는 것은 부적절할 수 있고 또 여러 연구 보고에 의하면 암반 내 절리는 self-similar 프랙탈이 기 보다는 self-affine 프랙탈로 알려져 있다(Kulatilake et. al., 1995; Mandelbrot et. al., 1983; Odling et. al., 1994). 암반의 절리면 형상이 self-similar이 아니므로 self-affine 프랙탈이라는 가정에서, 암반 절리면의 형상에 적합한 프랙탈 계수를 구하는 여러 방법이 연구 보고되어 있다. 그 중에는 variogram 법(Kulatilake et. al., 1998), spectral 법(Shirono et. al., 1997; William et. al., 1991; Stephen et. al., 1985), roughness-length법(Kulatilake et. al., 1999)과 line scaling법(Kulatilake et. al., 1997) 등이 있다. 그런데 암반의 절리 형상이 self-affine 프랙탈이라는 가정에서는 프랙탈 계수와 암반 절리의 거칠기 계수 JRC 사이의 관계를 나타내는 유용한 식이 아직 보고되지 않았다. 따라서 암반 절리면의 형상을 self-affine 프랙탈 계수로 표시할 수는 있지만 이로부터 암반 절리면의 JRC를 구할 수 없는 상태이다.

한편 터널이나 지하공간 또는 암반 사면과 같은 암반 구조물은 현지 암반의 절리면 거칠기JRC에 따라 역학적 안정성이 좌우된다. 현지 암반의 절리길이는 표준

절리면거칠기 곡선과 비교하기 위하여 이용하는 절리 길이 10 cm보다 상당히 긴 경우가 대부분이다. 이와 같이 대규모 암반 절리면의 거칠기JRC를 결정하는 방법은 암반 절리면에서 10 cm 길이의 절리면 형상을 본떠서 10개의 절리면 표준프로파일곡선과 비교해 가장 유사한 곡선을 선택하고 0 ~ 20의 사이의 JRC 값을 결정한 다음, 절리의 길이에 따라 치수보정하여 구하는 것이 가장 일반적인 방법이다(Bandis et. al., 1981). 그런데 이와 같이 표준길이 10 cm의 절리면 거칠기로 부터 소규모 암반의 거칠기 계수를 구하는 방법은 실험실에서 사용하는 수십 센티미터의 비교적 작은 길이의 절리에 적용하기 적합한 방법이다. 그러나 전술한 바와 같이 표준 절리면거칠기 곡선 10개와 실제 절리면의 거칠기곡선을 비교함에 있어, 실제 절리면과 가장 유사한 표준곡선을 선택하는 것이 측정자에 따라 다르고, 그 결과 절리면의 거칠기 JRC도 다르게 평가된다. 이는 절리면의 형상을 10 개로 제한한 표준 절리면거칠기 곡선으로 자연 암반에 분포한 모든 절리의 형상을 나타낼 수 없기 때문이다. 따라서 10 cm길이 절리의 거칠기 계수로부터 대규모 암반 절리면거칠기 JRC로 환산할 때에도 주관적인 평가가 내포되지 않을 수 없다.

그러므로 대규모 암반 절리면의 거칠기를 구하는 가장 좋은 방법은 절리 길이에 따라 필요한 치수보정 과정을 거치지 않고 암반에 나타난 대규모 절리의 거칠기를 직접 측정하는 것이다. 대규모 암반 절리면의 거칠기를 구하는 방법 중 하나를 Barton 등(1981)이 연구 보고한 바 있다. 이 방법에 의하면 절리의 길이 L과 절리면에서 돌출된 부분(asperity)중 최대높이와 최소높이의 차이인 돌출부 진폭 a로부터 대규모 암반 절리의 JRC값을 구하도록 되어있다. 즉 작은 길이인 10 cm의 암반절리에 사용하는 표준 절리면 거칠기 곡선을 이용할 필요가 없고, 동시에 10개로 제한된 표준곡선에 구애 받지 않으며, 절리의 길이를 고려한 치수보정 과정 없이 대규모 암반 절리면의 거칠기 계수 JRC를 구할 수 있다(Barton et. al., 1981; Barton et. al., 1990).

그러나 대규모 암반의 절리면 거칠기를 구하기 위해서는 효율적인 측정장치가 필요하다. 실험실에서와 같이 절리의 길이가 10 cm인 경우에는 JRC를 측정하기 위해 시료를 다루는 것에 불편함이 없지만 절리가 대규모로 수 미터 되는 경우에는 현장에서 측정길이와 돌출부 진폭을 효율적으로 측정할 장비 혹은 장치가 필요하다. 현재 암반 절리면에 접촉해야 하는 접촉식과 접촉이 필요 없는 비 접촉식 측정방법이 있지만(Feng et. al., 2003), 대규모 절리면을 대상으로 사용하기에는 제한이 있다. 특히 접촉식 장비를 사용하는 경우에는 측

정자가 조사 대상 암반 절리면에 접근하고 장비를 운반, 설치해야 하므로 시간은 많이 소요되거나 얻을 수 있는 자료는 상대적으로 많지 않고 자료를 얻는 과정을 재현하기도 어렵다. 때로는 암반 절리면에 접근하는 것이 안전 상 문제가 되거나 접근할 수 없어서 대규모 암반 절리면의 거칠기를 측정하지 못 하는 경우도 있다. 비 접촉식 방법은 암반을 접촉하는 일 없이 JRC를 측정할 수 있는 방법으로 작업속도가 빠르고, 정확하고, 재현이 가능하고, 조사한 자료량이 많으며 작업이 안전한 장점이 있다. 암반 절리의 특성을 조사할 수 있는 여러 가지 비 접촉식 조사 방법 중 라이더(LIDAR, light detection and ranging) 등을 사용해서 절리면의 방향 등을 조사한 연구가 증가하고 있다(Park, 2006; Mah, 2008; Pringle, 2004; Kemeny, 2003; Fardin, 2004; Lato, 2008; Bäckström, 2008; Feng, 2001). 라이더는 대규모 암반 절리면을 원거리에서 짧은 시간에 스캔하여 절리면의 거칠기를 3차원 좌표값으로 보여줄 수 있고 디지털 사진으로 절리면의 형상을 저장할 수도 있다.

이번 연구에서도 라이더와 Split-FX 소프트웨어를 사용해서 대규모 절리면의 거칠기계수 JRC를 구하였다. 대규모 암반 절리를 스캔한 곳은 콜로라도 유레이 고속도로에 있는 암반사면이다. 이 곳의 암반 절리는 길이와 폭이 약 10~7 m의 대규모였다. 이 절리면은 암반 사면을 라이더로 스캔하여 얻은 3차원 좌표의 집합인 포인트 클라우드를 Split-FX로 처리하여 추출해 낸 것이다.

2. 라이더 장비와 소프트웨어

2.1. 라이더 장비

라이더 또는 3차원 레이저 스캐닝은 조사 대상 암반을 향해 레이저를 투사한 후 반사되어 되돌아온 레이저를 받아 반사점까지의 거리를 구하는 원리를 이용하는 것이다. 조사대상 암반 전체를 짧은 시간에 내에 스캔할 수 있으며, 대상물의 면적에 따라 수백만 개 이상의 3차원 좌표값도 얻을 수 있는데 이를 포인트 클라우드(point cloud)라고 한다. 라이더는 레이저를 투사하여 반사점까지의 거리를 구하는 방법에 따라 time-of-flight와 phase-shift 형식의 장비로 구분할 수 있다. 이 둘 중 time-of-flight 형식은 레이저를 투사하여 반사점까지 도달하는데 소요된 시간을 먼저 계산하고 반사점까지의 거리는 빛의 속도와 시간을 곱하여 구한다. 또 다른 방법인 phase-shift 형식은 레이저를 일정한 주기의 파형으로 투사했을 때 반사점에서 반사된 레이저의 파형은 위상이 변하므로 위상변화와 발진주파수로부터 시간을 구하고 빛의 속도를 곱하여 투사점과 반사점 사이의 거

리를 계산할 수 있다. time-of-flight 장비는 phase-shift 장비에 비하여 먼 거리의 대상물을 스캔할 수 있기 때문에 원거리 대규모 암반사면이나 노두의 스캔에 더 적합하다. 본 연구에서는 먼 거리 암반이나 노두를 대상으로 절리면의 거칠기를 측정하는 것이 목적이므로 time-of-flight 종류의 라이다 장비를 고려하였다. time-of-flight 라이다 장비도 여러 종류의 제품이 있으나, 그 중 Optech ILRIS-3D 장비를 사용하였다. Optech ILRIS-3D의 사양을 보면 투사되는 레이저 빛의 파장은 1550 nm, 최소측정거리는 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 degree 이다.

2.2. 포인트 클라우드 분석 소프트웨어

투사한 레이저 빛이 사면에서 반사되어 돌아오면 거리를 계산하고 이를 3차원 좌표값으로 저장한다. 이 과정을 1초당 수 천회 이상 반복하면서 스캔작업을 진행한다. 따라서 스캔 작업 중 많은 양의 측정자료를 얻고 저장하는데 이를 포인트 클라우드라고 한다. 라이다를 통해서 얻은 포인트 클라우드를 적절한 소프트웨어로 처리하면 암반 내 여러 절리 특성을 파악할 수 있다. 라이다 장비 제조사들은 자체장비에 맞춘 자료처리용 소프트웨어를 가지고 있지만 포인트 클라우드 처리 전용 소프트웨어도 소수 있다. 대부분의 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어는 기계설계, 건축설계 등에 활용할 목적으로 만들었지만 암반공학적인 특성을 고려한 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어로 Split-FX가 있다. Split-FX의 특징은 포인트 클라우드에서 암반 절리면을 자동으로 추출해내고 그 절리면의 방향, 절리면의 넓이와 형상, 절리면의 거칠기를 계산할 수 있다. 추출한 절리면을 방향과 경사에 따라 절리군으로 자동 분류할 수 있고 피셔상수(fisher constant) 등 암반절리 관련 통계값을 계산하는 기능과 포인트 클라우드로부터 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 윤곽 또는 절리를 따라 선을 그리면 절리의 간격과 길이, 방향 등을 추가로 계산할 수 있다. 만약 동일한 사면에 대해 서로 다른 시간에 3차원으로 스캔하였다면 두 포인트 클라우드 파일을 비교하여 불량되거나 이동한 암반의 위치와 크기 및 이동 속도 등 시간에 따라 발생한 암반 사면에서의 변화도 알 수 있다. 이와 같이 암반 절리면의 특징을 3차원 레이저로 스캔한 포인트 클라우드 자료와 이를 Split-FX

소프트웨어로 처리한 결과로부터 구할 수 있으므로 RMR이나 Q와 같이 암반을 공학적으로 분류할 때 필요한 절리 관련 인자값을 결정하는데도 도움이 될 것이다.

3. 라이다와 대규모 암반절리면의 JRC 측정

암반 사면을 라이다로 스캔하여 얻은 포인트 클라우드를 Split-FX 소프트웨어로 처리하여 절리의 방향, 길이, 간격 및 거칠기를 분석할 수 있으나 본 연구에서는 암반의 대규모 절리면 거칠기를 분석하는 데에 사용하였다.

3.1. 절리 특성 분석의 절차

암반 절리면의 거칠기(JRC)를 알기 위해서는 먼저 절리면을 찾아야 하는데, 그 중 규모가 큰 절리로 조사자가 직접 접근하기 어렵고 10 cm 길이의 표준 절리면 거칠기 곡선을 이용해서 암반의 거칠기계수 JRC를 구하는 것이 불합리한 것으로 판단되는 경우를 선택하였다. 이를 위한 일반적인 절차 중 첫 번째 순서는 대상이 되는 암반사면을 라이다로 스캔하여 포인트 클라우드를 생성하고 저장한다. 다음 단계는 포인트 클라우드를 이용하여 스캔 대상면을 작은 크기의 요소로 나누고 그물처럼 연결망을 생성하는 것이다. 이때 요소의 모양은 삼각형이고 평면이다. 이와 같은 요소망의 생성과정에서 암반 사면 앞에서 레이저의 진행을 막았던 방해물, 예를 들면 지나가는 차량, 나뭇가지 등을 걸러내어 제거 한다(Virtual Geomatics, 2008; Pfeifer, 2004). 다음 단계는 삼각면들로 구성된 요소망에서 절리면을 찾아내는 것이다. 절리면은 여러 개의 패치(patch)로 구성될 수 있다. 패치는 특정 삼각형요소와 그 주변의 여러 삼각형 요소가 같은 평면 상에 있는 것을 뜻한다. 패치의 경계를 구하기 위하여 하나의 삼각면을 선택하여 수직벡터를 계산하고 그 주변에 있는 삼각면들의 수직벡터의 방향 차이가 주어진 허용범위 내에 있을 때 이를 동일한 패치로 정하게 된다. 패치를 구할 때 비교하는 수직벡터 차이의 허용범위는 사용자가 정할 수 있다. 본 연구에서는 삼각면 요소가 최소 5개 서로 인접되어 있고 각 삼각형 요소에 대한 수직벡터들의 방향차이가 10도 이내인 경우를 하나의 패치로 정하였다. 일단 패치를 추출하면 패치의 방향을 스테레오네트 상에 표시할 수 있고 각 패치군에 대한 통계적 특성을 결정할 수 있다. 또 포인트 클라우드로 자료가 저장되어 있으므로 추가 조사가 필요할 때에도 다시 현장을 답사하지 않고 재분석할 수 있다.

3.2. 절리길이와 절리면 돌출부의 진폭에 의한 JRC의 결정

대규모 암반 절리의 거칠기계수 JRC를 측정하는 방법은 일정길이 L 의 직선자를 절리면 위에 놓고 직선자로부터 절리면의 돌출부까지의 높이를 측정하여 그 중 최대진폭 a 를 구한다. 이 때 절리면 위에서의 측정길이 L 과 절리면에서 돌출된 높이의 진폭 a 에 의해 절리면 거칠기계수 JRC는 다음 식들과 같이 계산된다.

JRC=400 a/L , $L=0.1$ m 일 때

JRC=450 a/L , $L=1$ m 일 때

JRC=500 a/L , $L=10$ m 일 때

L : 측정된 절리길이(m)

a : 절리면의 돌출높이진폭(m)

이 식들은 10 cm길이의 200개 절리에서 거칠기를 측정한 결과와 Bandis가 연구 보고한 인공 절리면의 거칠기계수로부터 얻어진 것으로 보고되어 있다(Barton, 1981). 또 이 방법을 이용하여 대규모 암반의 거칠기를 구하고 암반사면의 안정성 등을 검토한 연구사례도 있다(Barton et. al., 1990; Vidar et. al., 2008). 이 식들을 그래프로 표시하면 Figure 5와 같다. 이 식의 장점은 절리의 길이에 따른 보정이 필요하지 않다는 것이다. 절리의 길이에 따라 치수효과를 암시적으로 포함하고 있기 때문이다. 그러나 절리면의 형상변화에 따른 절리면곡선의 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다.

4. 대규모 암반 절리면의 JRC 분석

4.1. 대규모 암반 절리의 추출

Figure 1은 이번 연구의 대상인 암반사면으로 미국 콜로라도 주 유레이 도로의 사면 중 일부분이다. 대상이 되는 사면방향에 수직인 방향으로 약 30 m 떨어져 라이다로 스캔하였고 Split-FX 소프트웨어를 사용하여 절리면을 자동 추출한 결과이다. Figure 1a는 포인트클라우드이다. 대규모 암반 절리면을 스캔한 결과로 얻는 포인트 클라우드를 Split-FX 소프트웨어로 처리하여 평면의 삼각형 요소망을 구성한다. 이때 삼각형 요소의 모서리 길이는 스캔 간격보다 크게 하였다. 사용한 장비의 스캔 간격은 2 cm 내외이다. Figure 1b는 스캔한 포인트클라우드를 이용하여 절리면을 삼각면으로 분할한 것이며, Figure 1c는 절리면의 경계를 나타낸 것이다. Figure 1에서 보이는 것과 같이 대규모 절리면이 3개 추출되었고, 이 중 면적이 가장 큰 오른쪽의 절리면에서 거칠기계수 JRC를 구하였다. 이 절리면에서 거칠기

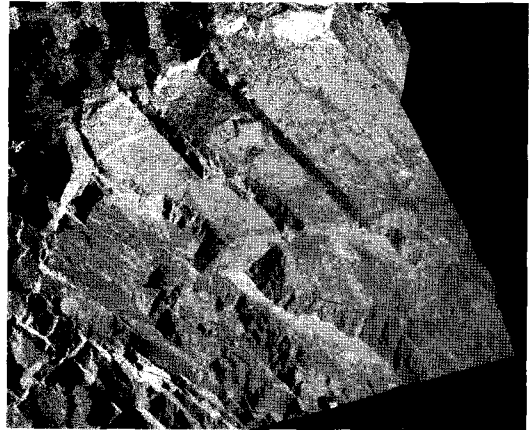


Figure 1a. Point cloud for the joint surface

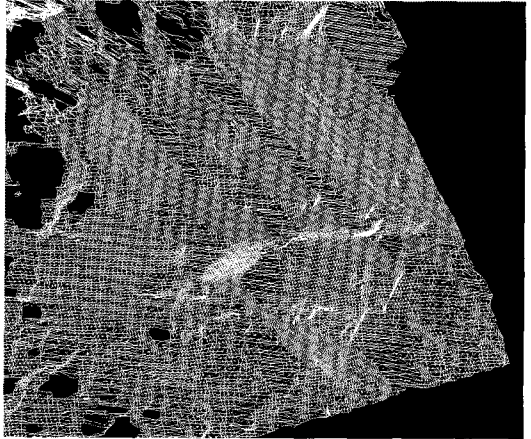


Figure 1b. Triangulated mesh for point cloud shown in Figure 1a

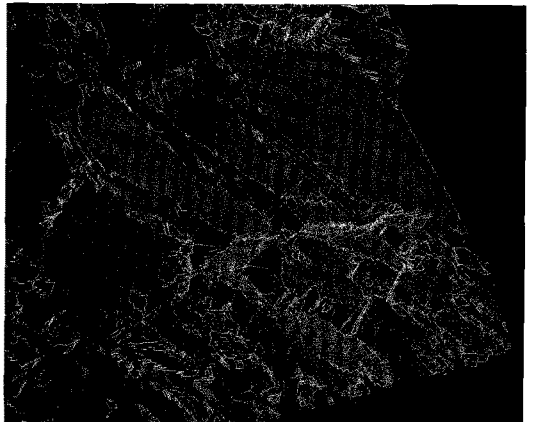


Figure 1c. Automatic delineation of fractures for the point cloud in Figure 1b.

기계수 JRC를 측정하기 위하여 가장자리를 제외하고 선택한 절리면의 형상은 Figure 2와 같고, 길이가 경사

방향이고 최대 약 10 m, 폭이 주향방향이고 최대 약 7 m 이다.

4.2. 암반 절리면 JRC의 측정방법

먼저 절리면의 길이 방향으로 절리면의 거칠기 JRC를 측정할 수 있도록 단면도를 만들고 단면도 상의 좌표값을 저장한다. 측정하고자 하는 길이 L를 정하고 측정길이 내에 있는 돌출부들의 좌표값을 이용하여 최적의 일차함수를 구한다. 이 함수로부터 수직방향으로 절리면에서 돌출된 높이를 계산하여 최대진폭a를 구한다. 이와 같은 계산방법은 현장에서의 측정작업을 그대로 모사한 것이다. 마치 일정한 길이의 막대처럼 측정길이를 그대로 유지하고 단면도의 시점에서 종점방향으로 평행이동 해가면서 같은 과정을 반복하여, 일정한 측정길이 L로 여러 개의 JRC를 구할 수 있도록 하였다. 측정길이 L을 변경하여 동일한 측선에서 거칠기 계수 JRC가 변하는 현상, 즉 치수효과를 검토하도록 하였다. 측정길이 L을 0.1 m, 0.5 m, 0.8 m 또 1 m에서 최대 10 m 까지 1 m 간격으로 변경하면서 절리면의 거칠기 계수 JRC를 측정하였다. 측정 대상 절리면의 폭이 넓으므로 길이방향 측정선의 간격은 약 1 m가 되도록 하여 5개 측선을 설정하였다. 마찬가지로 절리면의 폭 방향 측정선은 2 m 간격으로 5개 설정하였다. 또 절리면 거칠기의 이방성을 알기 위해서 절리면의 중심에서 절리면의 길이 방향과 폭 방향의 사이 방향 즉 2개의 대각선 방향으로 C1과 C2 측정선을 설정하였다. 그 결과 측정선의 배열은 Figure 2와 같다.

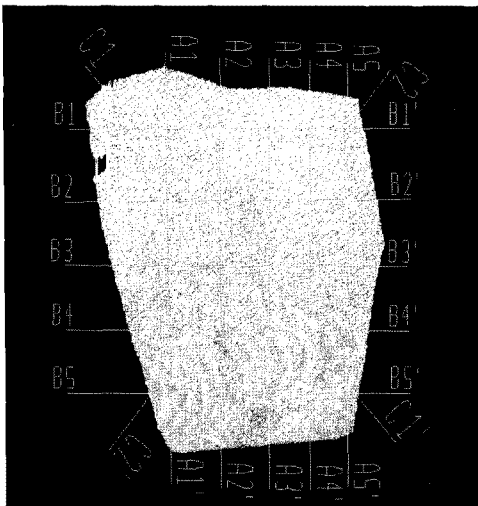


Figure 2. Shape of rock surface and JRC measurement lines.

4.3. 대규모 암반 절리면의 JRC 분석

Figure 2와 같은 대규모 암반 절리면의 길이방향 A와 폭 방향 B 및 대각선 방향 C의 절리면 거칠기 곡선의 형상은 Figure 3과 같다.

Figure 3과 같은 절리거칠기 곡선 상에서 거칠기 측정길이 L을 0.1 m~10 m까지 변경하면서 JRC를 구하였다. 라이더의 포인트 클라우드로부터 측정선 단면 상의 좌표값을 내려 받으면 측정선의 방향에 따라 좌표는 간격이 일정하지 않게 된다. 예를 들면 A3 측정선에서 수평방향의 간격은 1 mm~7.6 mm이고 평균간격은 약 2.6 mm이다. 일정 측정길이 L로 측정선을 따라 평행이동하면서 거칠기를 측정하는데 평행이동 거리를 일정하게 유지하면서 측정하는 것이 아니라 내려 받은 파일에서 첫 번째 좌표에서 측정을 시작하여 거칠기를 구하고 바로 인접한 다음 좌표에서 측정을 재 시작하였다. 이 경우 동일한 구간을 여러 번 반복하면서 측정하므로 측정선 상에서 측정이 안된 부분이 없게 되고 측정횟수가 늘어나게 된다. 다음 Table 1은 측정선의 길이와 각 측정선에서 측정길이에 따른 JRC 측정횟수를 요약한 것이다.

먼저 절리면에 설정한 측정선에 따라 측정된 절리면 돌출높이의 진폭 a의 변화를 검토한다. 절리면 돌출높이의 진폭 a는 절리면의 돌출부 중 가장 높은 곳과 가장 낮은 곳의 높이 차를 의미한다. Figure 4는 여러 측정선 중 측정선 A3에서 측정길이 L의 변화에 따라 측정된 절리면 돌출높이의 진폭 a인데, 평균값은 실선으로 연결하였고 평균값의 상하로 변동범위를 표시하였다. Figure 4에서 보듯이 측정길이 L에 따라 절리면 돌출높이의 진폭 a가 큰 폭으로 변하는 것을 알 수 있다. 또 측정길이가 0.1 m에서 9 m로 길어짐에 따라 절리면 돌출높이의 진폭 a는 일정한 값 약 150 mm에 수렴하는 현상을 보이고 있다.

이번 연구에서는 절리면 상에서 측정길이 L과 절리면 돌출높이의 진폭 a에 따라 JRC를 구하는 것이고 Figure 5는 이에 따라 계산한 JRC를 보인 것이다. Figure 5에서 왼쪽아래에서 오른쪽 위 방향으로 보이는 직선들은 JRC값 1~20을 표시한 것이다. 또 삼각형은 측정선 중 A3에서 측정길이의 변화에 따른 절리면 돌출높이의 진폭 a 중 평균값을 이용해서 계산한 JRC를 표시한 것이다. Figure 5에서 JRC의 특성을 보면 측정길이 L이 증가함에 따라 JRC값은 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉 Figure 4에서 검토하였듯이 측정길이 L이 증가하면 절리면 돌출높이의 진폭 a는 증가율이 둔화하고 JRC값은 감소하는 치수효과를 Figure 5와 같이 보이고 있다.

절리면 JRC의 치수효과와 측정된 절리면 돌출높이의

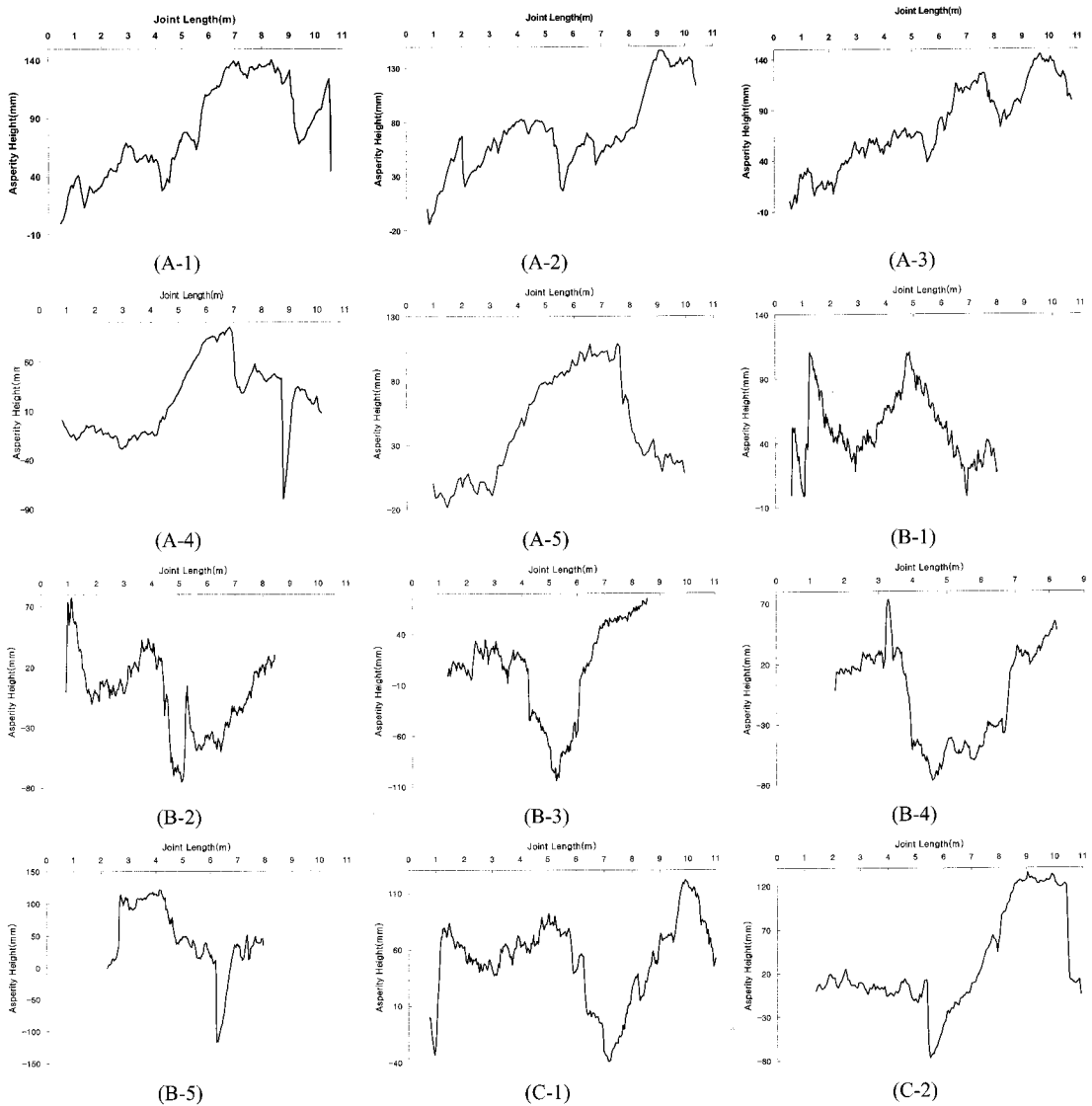


Figure 3. Joint roughness curves of the measurement lines A, B and C in Figure 2.

진폭 a가 평균값에서 상하로 변동됨에 따른 JRC값의 변동을 Figure 6에서 알 수 있다. Figure 6은 측정선 중 A3에서 JRC를 구한 것인데, 측정길이 L이 0.1 m~2 m 일 때에는 JRC가 커지는 경향을 보였다. 측정 길이 L이 길어짐에 따라 JRC는 감소하는 것이 JRC의 치수효과로 알려져 있다. 그런데 이와 같이 측정길이가 0.1 m에서 2 m까지 길어짐에도 불구하고 JRC가 커지는 현상은 라이다로 스캔할 때 스캔간격이 넓어 측정길이 10 cm에 포함된 절리면 좌표값의 수효가 적었기 때문이다. 이번 연구에서 라이다로 스캔할 때 스캔 간격은 평균 약 2 cm이었다. 그러므로 절리 거칠기 측정길이 L이 10

cm이면 거칠기를 표시하는 측정점은 평균 5개 정도이므로 JRC를 구할 때 신뢰할 수 없는 값을 나타낼 수 있다. 이번 연구는 대규모 절리면의 거칠기계수 JRC를 측정하는 것이므로 측정길이가 2 m 이상인 경우를 주로 분석하였다. 그러나 해상도가 더 높은 라이다로 절리면을 스캔한다면 0.1 m와 같이 작은 측정길이에서도 정확한 JRC를 알 수 있을 것이다. Figure 6에서 절리면 돌출높이의 진폭 a중 평균값을 이용해서 구한 JRC는 측정길이가 2 m 이상이면 측정길이 L에 따라 감소하는 경향을 보였다. 또 절리면 돌출높이의 진폭 a의 변동에 따라 JRC도 크게 변동되는 것을 보이고 있다. 기타의 측정선

Table 1. Number of JRC measurements depending on profile line Symbol of section Length of section (m) Length of profile (m) and number of measurements

Symbol of section	Length of section (m)	Length of profile (m) and number of measurements												
		0.1	0.5	0.8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A1	10.1	264	260	254	248	218	190	162	138	112	84	58	30	5
A2	10.3	239	243	236	230	205	179	151	124	97	68	43	17	
A3	10.2	246	244	236	232	204	177	149	125	98	68	39	13	
A4	9.3	240	238	230	225	196	169	141	114	90	63	35	8	
A5	8.9	233	228	222	216	167	157	131	105	77	53	26		
B1	7.4	405	383	366	355	288	243	189	134	80	24			
B2	7.5	413	390	376	364	310	255	197	140	86	31			
B3	7.2	392	371	354	343	290	237	180	123	67	12			
B4	6.5	353	332	316	304	252	197	143	82	27				
B5	5.7	312	290	274	262	205	149	91	38					
C1	10.7	568	547	529	519	465	414	361	307	251	197	145	90	37
C2	9.5	283	269	260	253	223	194	165	136	105	75	45	14	

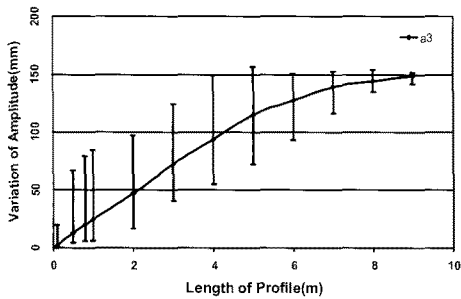


Figure 4. Variation of joint asperity amplitude depending on profile length on the A3 line.

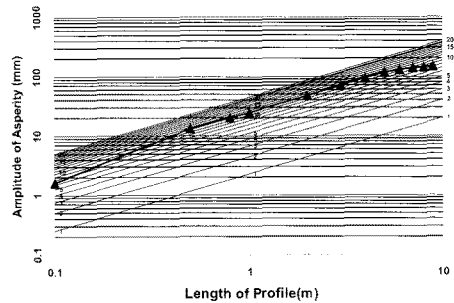


Figure 5. JRC decided by amplitude of joint asperity and length of profile on the A3 line.

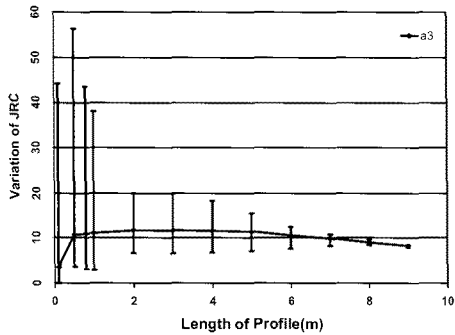


Figure 6. Variation of JRC depending on profile length on the A3 line.

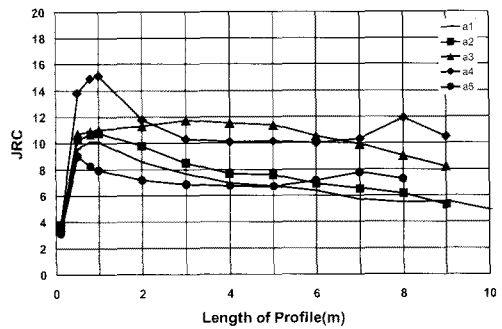


Figure 7. JRC depending on profile length on the A lines.

A, B, C에서도 유사한 경향을 보였다.

다음으로 절리면의 거칠기 JRC를 측정방향에 따라 검토하였다. 절리면 돌출부의 진폭 a 중 평균값과 평균

측정길이 L을 이용하여 검토하였다. 절리면 중 경사방향의 측정선 A에서의 JRC는 Figure 7과 같다. Figure 7를 보면 측정길이 L이 길어지면 부분적으로 JRC가 증

가하는 것처럼 보이거나 전체적인 경향은 측정길이 L이 길어지면 JRC는 감소하는 추세를 보이고 있다. 또 측정길이가 10 m까지 증가하더라도 JRC값은 어느 특정값에 수렴하기 보다는 감소하는 추세를 유지하고 있다. 또 측정선 A는 같은 방향인 절리면의 경사방향으로 거칠기를 측정했지만 측정선의 위치에 따라 JRC가 서로 다름을 보이고 있다. 즉, 측정선 A 중 JRC의 최소값은 A1에서 측정길이 10 m일 때 약 4.9, 최대값은 A5에서 측정길이 9 m일 때 약 10.5이었다. 따라서 실제 대규모 절리면에서 JRC를 측정할 때에는 측정위치에 따라 JRC의 변화가 클 수 있으므로, 동일한 절리면이라도 측정선을 여러 개 설정하여 평균값을 구하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 절리면의 거칠기 중 A 측정선을 이용하여 측정길이에 따른 가중평균으로 최대 측정길이와 JRC를 곱하여 합하고 이를 최대 측정길이의 합으로 나눈 것을 경사방향에서의 JRC로 결정한다면 이는 약 7.2이었다.

절리면 주향방향의 측정선 B에서의 JRC는 Figure 8과 같다. Figure 8을 보면 경사방향에서의 JRC와 유사한 현상으로 측정길이가 길어지면 부분적으로 JRC가 증가하는 것처럼 보이거나 전체적인 경향은 JRC가 감소하는 경향을 보이고 있다. 측정길이 L이 증가하더라도 JRC값은 어느 특정값에 수렴하기 보다는 계속해서 감소하는 추세를 보이는 것은 측정선 A에서의와 같다. 측정선 B는 절리면의 주향방향으로 거칠기를 측정했지만 역시 측정선의 위치에 따라 JRC가 서로 다름을 보이고 있다. 즉, 측정선 B 중 JRC의 최소값은 B2에서 측정길이 7 m일 때 약 8.5, 최대값은 B5에서 측정길이 5 m일 때 약 19.6이었다. 따라서 실제 대규모 절리면에서 주향방향으로 JRC를 측정할 때에도 측정선을 여러 개 설정하여 평균값을 구하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 절리면의 거칠기 중 B 측정선을 이용하여 측정길이에 따른 가중평균으로 주향방향에서의 JRC를 결정한다면 이는 약 11.5이었다.

절리면 중 주향과 경사 방향에서 약 45도 회전한 방향의 측정선 C에서의 JRC는 Figure 9와 같다. 측정선 C 중 C1은 절리면의 오른쪽 위에서 왼쪽 아래 방향으로, C2는 왼쪽 위에서 오른쪽 아래 방향으로 향한 것이다. Figure 9를 보면 측정길이가 길어짐에 따라 부분적으로 JRC가 증가하는 것처럼 보이거나 전체적인 경향은 JRC가 감소하는 경향을 보이고 있다. 또 측정길이가 10 m까지 증가하더라도 JRC값은 어느 특정값에 수렴하기 보다는 계속해서 감소하는 추세를 보이는 것은 측정선 A, B와 유사한 비 정상상태(non-stationary)이었다. 측정선 C는 서로 다른 절리면의 대각선 방향으로 JRC를 측정

한 것이지만 측정선의 위치에 따라 JRC가 거의 같음을 보이고 있다. 즉, 측정선 C1과 C2는 측정길이가 변하더라도 JRC값의 최대차이는 약 1.2에 불과하다. 측정선 C1에서의 최소값은 측정길이 10 m일 때 약 7.9, C2에서의 최소값은 측정길이 9 m일 때 약 8.9이었다. 따라서 절리면의 대각선 방향에서의 JRC 약 7.9~8.9이었다.

하나의 대규모 절리면에서 절리면의 경사방향 A, 주향방향 B, 또 이 두 방향의 사잇방향 C에서 JRC를 구하였으므로 서로 다른 측정방향에 따라 나타나는 JRC의 이방성을 검토하였다. 그런데 절리의 길이에 따라 JRC가 다르므로 먼저 측정방향에 관계없이 측정길이가 일정한 상태에서 JRC의 이방성을 비교하고 다음 절리면의 실제 형상을 감안한 상태에서 JRC의 이방성을 검토하였다. 측정선 A, B, C의 공통 측정길이 중 최대 길이는 B5의 5 m이므로 측정길이가 5 m일 때 A, B, C1, C2에서의 평균 JRC를 비교하였다. 이 때 절리면의 경사방향인 A 측정선에서의 평균 JRC는 약 8.5이고, 주향방향인 B 측정선에서의 평균 JRC는 약 14.0이었다. 서로 다른 대각선 방향 측정선 C1과 C2에서의 JRC는 각각 11.4, 12.1로 경사방향과 주향방향의 JRC값의 사이 값이었다. 따라서 이번 연구 대상의 절리는 JRC가

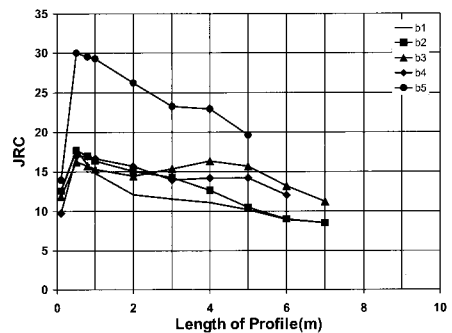


Figure 8. JRC depending on profile length on the B lines.

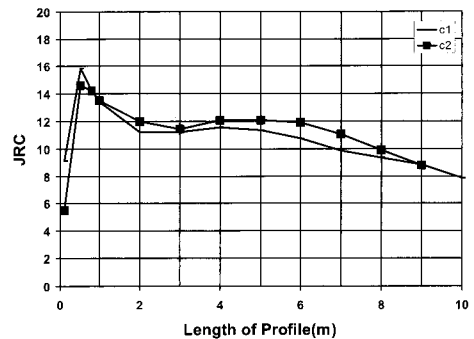


Figure 9. JRC depending on profile length on the C lines.

이방성을 지니고 있는 것으로 분석되었다. 또 실제 절리형상에서 JRC의 이방성은 더욱 뚜렷해진다. 이 상태에서 경사방향인 A 측정선에서의 평균 JRC는 약 7.2이고, 주향방향인 B 측정선에서의 평균 JRC는 약 11.5, 서로 다른 대각선 방향 측정선 C1과 C2 에서의 JRC는 각각 7.9, 8.8로 경사방향과 주향방향의 JRC값의 사이 값이었고 역시 JRC의 이방성을 보였다. 즉 절리면의 경사방향보다 주향방향에서의 JRC가 약 1.6배 컸다.

5. 결론

라이다와 Split-FX 포인트 클라우드 소프트웨어를 사용해서 추출해낸, 길이와 폭이 각각 약 10 m, 약 7 m인 대규모 절리면에서 절리면의 경사방향인 길이 방향과 주향방향인 폭 방향 외에 절리면의 대각선 방향의 거칠기곡선을 적절한 간격의 좌표값으로 저장하였다. 저장한 절리면 거칠기곡선의 좌표값을 이용하여 절리면 거칠기 측정길이 L을 0.1 m에서 10 m까지 변화시키면서 절리면 돌출높이의 진폭 a를 구하여 절리면 거칠기계수 JRC를 계산하고 그 특성을 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 대규모 절리면에서 거칠기의 측정길이 L이 2 m에서 10 m까지 길어짐에 따라 절리면 거칠기계수 JRC는 감소하는 치수효과를 보였다. 측정길이 L이 증가함에 따라 절리면 돌출높이의 진폭 a는 증가한 후 일정한 값에 수렴하는 추세이지만, 절리면 거칠기계수 JRC는 비 정상상태(non-stationary)로 계속 감소하는 추세를 보였다.
2. 대규모 절리면에서 절리면 상의 측정위치에 따라 측정되는 거칠기계수 JRC가 다르므로, 대규모 절리면의 거칠기계수 JRC를 합리적으로 구하기 위해서는 여러 측정선에서 JRC를 측정해야 할 것이다.
3. 대규모 절리면에서 절리면의 경사와 주향방향 및 두 방향에서 45도 회전한 방향에서 각각의 절리면 거칠기계수 JRC를 구하고 비교한 결과, 절리면 거칠기계수 JRC는 주향방향에서 가장 크고 경사방향의 JRC가 가장 작으며 두 방향에서 45도 회전한 사잇 방향에서는 주향과 경사방향 JRC의 사이 값을 보여 대규모 절리면 거칠기계수 JRC가 이방성을 나타내는 것을 확인하였다.

라이다와 포인트 클라우드 처리용 소프트웨어 Split-FX를 사용하여 길이와 폭이 각각 약 10 m와 약 7 m의 대규모 절리면의 거칠기 계수를 치수보정을 거치지 않고 효

과적으로 측정할 수 있었다. 향 후 해상도가 더 높은 라이다를 사용하여 스캔 간격을 좁게 한다면, 절리측정길이 L이 작은 경우에도 대규모 암반 절리면의 정확한 거칠기 계수를 구할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Goodman, R.E., 1989. Deformability of Rocks, Introduction to Rock Mechanics. 2nd Edition. Wiley, New York, p.562.
2. Brady, B.H.C., Brown, E.T., 1994. Rock Mechanics for Underground Mining. Chapman & Hall, London, UK, p.571.
3. Nelson, R.A., 1985. Geological Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Butterworth-Heinemann Publishers, Woburn, MA, p.336.
4. Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classification. Wiley, New York, USA, p.251.
5. Priest, S.D., 1993. Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Chapman & Hall, London, p.473.
6. N. Barton, 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints. Eng Geol 7, pp.287-332.
7. ISRM, 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 15 319-368.
8. N.H. Maerz, J.A. Franklin and C.P. Bennett, 1990, Joint roughness measurement using shadow profilometry. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 27, pp.329-343.
9. Hsiung, S. M., Ghosh, A., Ahola, H. P., Chowdury, A. H., 1993, Assessment of conventional methodologies for joint roughness coefficient determination. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 30(7), 825-829.
10. P.H.S.W. Kulatilake, G. Shou, T.H. Huang and R.M. Morgan, 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 32, pp.673-697.
11. A. J. Beer, D. Stead, J. S. Coggan, 2002, Estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual comparison. Mech Mechanics and Rock Engineering, 35(1), pp.5-74.
12. T.H. Wu and E.M. Ali, 1978, Statistical representation of joint roughness. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 15, pp. 259-262.
13. R. Tse and D.M. Cruden, 1979, Estimating joint roughness coefficients. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 16, pp. 303-307.

14. J. Krahn and N.R. Morgenstern, 1979, The ultimate frictional resistance of rock discontinuities. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 16, pp.127-133.
15. P.M. Dight and H.K. Chiu, 1981, Prediction of shear behavior of joints using profiles. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18, pp.369-386.
16. M.J. Reeves, 1990, Rock surface roughness and frictional strength. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 27, pp.429-442.
17. J.R. Carr and J.B. Warriner, 1989, Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient, *Bull. Association of Engineering Geologists XXVI* (2), pp.253-263.
18. Y. H. Lee, J.R. Carr, D.J. Barr and C.J. Hass, 1990, The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles, *Int. J. Rock Mech., Min. Sci., & Geomech. Abstr.* 27, pp. 453-464.
19. N. Wakabayashi and I. Fukushige, 1992, Experimental study on the relation between fractal dimension and shear strength. Lake Tahoe, CA, Conf. Fractured and Jointed Rock Masses (June 3-5,) pp.119-124.
20. Mandelbrot BB, 1983, *The fractal of nature*. New York: W.H. Freeman.
21. N.E. Odling, 1994, Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficient. *Rock Mech Rock Eng* 27, pp. 135-153.
22. P.H.S.W. Kulatilake, J. Um, G. Pan, 1998, Requirement for accurate quantification on self-affine roughness using the variogram method. *Int. J. Solids Structures*. Vol. 35, Nos 31-32, pp.4167-4189.
23. T. Shirono, P.H. S.W. Kulatilake, 1997, Accuracy of the spectral method in estimating fractal/spectral parameters for self-affine roughness profiles. *Int. J. Rock Mech. Sci.* Vol. 34, No. 5, pp.789-804.
24. William L. Power, Terry E. Tullis, 1991, Euclidean and fractal models for the description of rock surface roughness. *Journal of Geophysical research*. Vol. 96, No. B1. pp.415-424. Jan. 10.
25. Stephen R. Brown, Christopher H. Scholz, 1985, Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces. *Journal of Geophysical research*. Vol. 90, No. B14. pp.12,575-12,582. Dec. 10.
26. P.H. S.W. Kulatilake, J. Um., 1999, Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the roughness-length method. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36, pp.5-18.
27. P.H. S.W., J. Um., G. Pan., 1997, Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the line scaling method. *Rock Mech. Rock Engng.* 30 (4), pp.181-206.
28. S. Bandis, A.C. Lumsden and N.R. Barton, 1981, Experimental studies of scales effects on the shear behaviour of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18, pp.1-21.
29. Nick Barton, 1981, Shear strength investigations for surface mining. *The third International Conference on Stability in Surface Mining.*, Vancouver, Chp. 7, AIME, pp.171-192.
30. N. Barton, S. Bandis, 1990, Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. *Proc. Int. Conf. Rock joints*. pp.603-610.
31. Q. Feng, N. Fardin, L. Jing, and O. Stephansson, 2003, A new method for in-situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces. *Rock Mech. Rock Engng.* 36(1), pp.3-25.
32. Park, E.S., Cheon, D. S., Synn, J. H., Jung, Y. B. and Choi, Y. K. , 2008, Characterization of discontinuities using 3-D laser scanner. *ARMA* 08-187.
33. Mah, J., Samson, C., McKinnon, S., and Aikman, D., 2008, Triangulation-based 3D laser imaging for underground rock mass characterization: Impact of operational parameters. *ARMA* 08-249.
34. Jamie Pringle, Andy Gardiner, Robin Westerman, 2004, Virtual geological outcrops-fieldwork and analysis made less exhaustive? *Geology Today*. Vol .20. No. 2 March -April pp.67-72.
35. John Kemeny, Randy Post, 2003, Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Computers & Geoscience* 29, pp.65-77.
36. N.Fardin, Q. Feng, O. Stephansson, 2004, Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.* 41, pp.329-335.
37. Matt Lato, Mark S. Diederichs, D. Jean Hutchinson, Rob Harrp, 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.ijrmms.2008.04.007
38. Bäckström, A., Feng Q. and Lanaro F., 2008, Improvement of fracture mapping efficiency by means of 3D-laser scanning. *ARMA* 08-106.
39. Q.Feng, P.Sjögren, O.Stephansson, L.Jing, 2001, Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. *Engineering geology* 59, pp. 133-146.
40. Virtual Geomatics. 2008. www.virtualgeomatics.com
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, pp.283 -287.
41. Vidar Kvelde, Björn Nilsen, Herbert H. Einstein, Farrokh Nadim, 2008, Alternative approach for analysis of a 100,000 m³ rock slide based on Barton-Bandis shear strength criterion. *Landslides*, 5:pp.161-176.



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