

3D Laser Scanner를 이용한 암반사면의 절리방향 측정의 신뢰성에 관한 연구

박선현, 이수곤*, 이벽규, 김치환

A Study on Reliability of Joint Orientation Measurements in Rock Slope using 3D Laser Scanner

Sun-Hyun Park, Su-Gon Lee*, Boyk-Kyu Lee, Chee-Hwan Kim

Abstract We must precisely investigate the mechanical characters of rock to design rock slope safely and efficiently. But the method of clinometer has some disadvantages. So, we need a new measurement that can replace the method of clinometer. In this study, we analyze the reliability of joint orientation measurements in rock slope using the 3D laser scanner and program Split-FX that is a point cloud data analysis software.

We could acquire the 495 pieces joint data through the automatic extraction of features. And we confirmed that there were some errors occurred with $\pm 4^\circ$ of dip and $\pm 5^\circ$ of dip direction. Generally, the method of clinometer has $\pm 5^\circ$ and $\pm 10^\circ$ error ranges of the joint orientation(dip/dip direction) that are the results of the advance research. Therefore, we analyzed the method of 3D laser scanner, and it is found to be efficient, reliable. This method is expected to mend the disadvantages of Clinometer method.

Key words Investigation of rock slope joint, Automatic rock joint extraction, 3D laser scanner, Joint orientation, Point cloud

초 록 암반사면을 안전하고 효율적으로 설계하기 위해서는 암반의 역학적 특성을 정밀하게 조사하여야 한다. 하지만 현재 사용되고 있는 클리노미터를 이용한 절리 조사의 한계점으로 인해 이를 보완할 수 있는 새로운 측정법의 연구가 필요로 하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 3D Laser Scanner와 점군 데이터 분석 소프트웨어 Split-FX를 이용하여 암반사면의 절리방향 측정의 신뢰성을 분석하였다. 절리면 자동추출 기능을 통하여 총 495 개의 절리 데이터를 얻었으며, 동일 지역을 클리노미터를 이용하여 측정한 38개의 데이터와 비교하여 분석한 결과 경사는 $\pm 4^\circ$, 경사방향은 $\pm 5^\circ$ 의 편차를 가지는 것을 확인하였다. 이러한 측정결과는 선행 연구를 통해 알게 된 클리노미터의 조사자에 따른 경사/경사방향 오차범위 $\pm 5^\circ/\pm 10^\circ$ 에 속하기 때문에 3D Laser Scanner를 이용한 절리데이터 취득 및 분석은 기존의 조사법을 보완할 수 있는 효율적이고 신뢰성 있는 조사법이라고 분석되었다.

핵심어 암반사면 절리조사, 절리면 자동추출, 3D 레이저 스캐너, 절리의 방향성, 점군 데이터

1. 서 론

Received: Feb. 11, 2015

Revised: Feb. 24, 2015

Accepted: Feb. 24, 2015

***Corresponding Author:** Su-Gon Lee

Tel) +82264902429, Fax) +82264905558

E-Mail) sglee@uos.ac.kr

Department of Civil Engineering, College of Engineering, The University of Seoul, 90, Cheongnong-dong, Tongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea

암반사면을 안전하고 효율적으로 설계하기 위해서는 암반의 역학적 특성인 암반의 절리 방향, 길이 등과 같은 암반 내 절리의 특성 조사가 정확하게 이루어져야 한다. 지금까지 현장에서 절리의 특성을 조사하기 위해서는 클리노미터(Clinometer)를 이용하여 조사자가 직접 암반사면에 접근하여 절리의 방향을 측정하고 암반의 역학적 특성을 정성적으로 기록하는 전통적인 방법을 사용하였고, 이를 더 체계적으로 조사하기 위해서 조사선 조사법(Scanline Method)과 조사창 조사법(Window Method)을 적용하였다(Priest, 1993). 하지만 이 두 방

법 모두 조사사 간의 비효율성, 조사자의 숙련도에 따른 조사결과와 상이성과 조사지역의 접근성 등과 같은 한계점이 꾸준히 제기되고 있다. 국내외의 많은 연구자들이 이런 한계점을 보완하기 위해서 디지털 암반 절리 조사법을 연구하였다. 디지털 암반 절리 조사법을 크게 두 종류로 구분하면 디지털 사진을 이용한 조사법과 3D Laser Scanner를 이용한 조사법이 있다. 디지털 사진 측량을 통한 암반의 절리 조사법은 많은 연구자들을 통해서 절리조사의 적용성과 3차원 좌표를 이용하여 암반 불연속면의 방향을 측정하는데 필요한 기초적인 및 화상처리 기법을 이용하여 절리선을 추출기법의 제시와 같은 연구를 꾸준히 진행하였으나(Hagan, 1980, Yue, et al., 1983, Reid, et al. 2000, Ryu, et al., 2000), 3차원 좌표를 만드는 과정이 복잡하고 일조량 및 해상도의 영향을 많이 받는 단점이 있기 때문에 최근에는 3D Laser Scanner를 이용하여 암반의 절리 조사법에 관한 연구가 이루어지고 있다. 3D Laser Scanner를 이용하면 접근이 어려운 대절토 사면이나 급경사지에서도 원거리 측정으로 전체적인 결과를 얻을 수 있으며 레이저 측정 기술의 발달로 인해 정확도를 높일 수 있는 장점이 있다. 따라서 이런 장점을 살리고자 많은 연구자들이 3D Laser Scanner를 이용한 암반사면의 절리 조사법과 조사결과를 정리하는 프로그램에 대한 연구를 진행하고 있다. Slob, Hack and Turner(2002)는 3D Laser Scanning을 이용한 암반의 불연속면 식별의 가능성을 증명하였으며, Park and Jeong(2003)은 동일 암반사면에 대해 3D Laser Scanner와 수치사진측량을 이용하여 비교 및 분석하였다. Slob and Hack(2004)은 암반의 불연속면 조사에서 적절한 3D Laser Scanner의 해상도와 용도에 알맞은 응용프로그램에 대한 연구를 하였다.

따라서 본 연구에서는 3D Laser Scanner와 미국 Split사에서 만든 Split-FX를 이용하여 울산광역시 울주군 언양면 대곡리에 위치하고 있는 반구대암각화 주변의 암반사면을 대상으로 3D Laser Scanner로 스캔한 결과를 Split-FX로 분석하여 기존 절리 측정법의 한계점을 보완하고 새로운 측정법의 신뢰도를 분석하여 실무 적용 가능성에 대하여 연구하고자 하였다(Park, 2015).

2. 측정 장비와 소프트웨어

2.1 3D Laser Scanner

3D Laser Scanner는 지상 LiDAR 시스템의 한가지로 기존의 Total Station 과 같은 1점 시준 방식을 탈피하여 관측대상물의표면에 조밀한 간격으로 무수히 많은 레이저를 통해 얻은 3차원 좌표로 대상물의 형태를

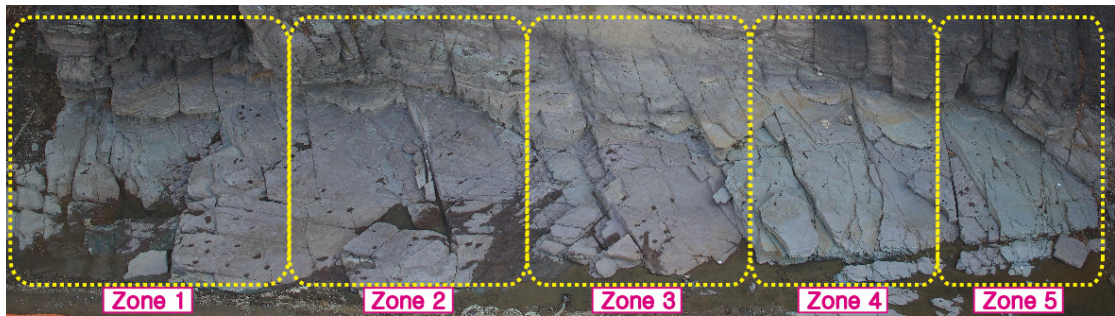
취득한다. 3D Laser Scanner는 Scanning 방식에 따라서 삼각측량방식(Triangulation Method)와 시간차방식(Time of Flight Method)로 구분할 수 있다. 삼각측량방식은 레이저가 대상 물체 표면에 투영된 것을 하나 또는 그 이상의 CCD 카메라로 측정 위치를 기록하며, 정확도가 비교적 높고 간단한 구조이며 가격이 저렴하지만 긴 측정 시간과 실물에 주사된 레이저가 CCD 카메라로 구분이 가능해야 하기 때문에 직사광선이 있는 곳에서는 데이터의 오류가 많이 발생하게 되고, 측정거리가 길어지면 오차가 커지는 단점이 있다. 그에 비해 시간차방식의 3D Laser Scanner는 레이저가 표면에서 반사되어 돌아오는 시간차를 계산하여 좌표를 결정하는데 이 방법은 삼각측량방식보다 먼 거리를 측정할 수 있으며, 측정시간이 빠른 장점이 있다 (Boehler and Marbs, 2002, Shin, 2005, Park, 2010). 따라서 본 연구에서는 연구 대상의 측정 거리와 제한된 시간을 고려하여 TOF 방식의 3D Laser Scanner인 스위스 Leica사의 ‘Scanstation 2’를 이용하여 연구를 진행하였다. 이 장비는 수평 360°, 수직 270°의 넓은 범위의 측정이 가능한 장점이 있다. 아래의 Table 1은 연구에서 사용한 장비의 제원을 정리한 것이다.

2.2 점군 데이터 분석 소프트웨어

3D Laser Scanner를 사용하여 대상사면을 측정할 때 Laser가 반사되어 돌아오면 거리를 계산하고 이를 3차원 좌표로 저장한다. 이 과정은 1초당 수천 회 반복되기 때문에 스캔 작업 중 많은 양의 측정 자료가 얻어지고 저장되는데 이를 점군 데이터(Point Cloud)라고 한다. 얻어진 점군 데이터를 처리하기 위해서는 전용 프로그램이 있어야 하는데 많은 소프트웨어들이 주로 기계설계, 건축설계 등에 활용할 목적으로 만들었기 때문에 암반 공학적 특성을 분석하기에는 적합하지 않다. 하지만 본 연구에서 사용한 미국 Split사의 Split-FX 소프트웨어는 점군 데이터를 이용하여 암반 절리를 자동으로 추출하고 그 절리면의 방향, 넓이와 형상, 절리면의 거칠기와 같은 암반 공학적 특성을 분석할 수 있도록 만들어졌다. 그리고 추출된 절리를 방향에 따라 절리군으로 자동 분류할 수 있고 피셔상수(Fisher Constant) 등 절리특성을 통계 처리하여 계산하는 기능이 있고, 자동으로 인식하여 분류된 절리를 평사투영(Stereonet)으로 출력할 수 있으며, 이미지처리(Image Processing) 기능으로 점군 데이터와 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 대하여 서로 다른 시간에 측정하였다

Table 1. Equipment Specification (Leica Geosystems, 2009)

Division	Specifications
Scanning Range	300m (90% Reflectivity Standard)
Scanning Speed	50,000 points/sec
Accuracy	Distance : 4mm/50m, Position : 6mm/50m
Field of View	Vertical : 270°, Horizontal : 360°
Model Surface precision/noise	2mm (One Sigma)
Spot Size	0-50m : 4mm
Metrology Method	Time of Flight
Laser class	3R (IEC-60825-1) visible green
Dimensions	26.5cm × 37.0cm × 51.0cm
Weight	18.5 kg
Operating Temperature	0°C - 40°C
Camera	Single 24°×24° image : 1024×1024 pixels (1megapixel)

**Fig. 1.** Field site of 5 Zones scanned using 3D Laser Scanner

면 이 두 개의 점군 데이터를 비교하여 붕락되거나 이동한 암괴의 위치와 크기 및 이동속도 등 시간의 경과에 따라 발생한 암반 사면의 변화도 알 수 있기 때문에 Split-FX 프로그램을 통해서 암반 절리면의 특성을 구할 수 있으므로 RMR이나 Q-System과 같이 암반을 공학적으로 분류하는 데 필요한 절리 관련 인자들을 결정하는 데 도움이 될 수 있다(Kim and Kemeny, 2008, Split Engineering, 2010).

3. 3D Laser Scanner를 이용한 절리 데이터의 분석

본 연구에서는 울산광역시 울주군 언양면 대곡리에 위치한 반구대암각화 주변의 암반사면을 조사 대상으로 선정하여 3D Laser Scanner로 스캔하여 얻은 점군 데이터를 Split-FX 소프트웨어로 처리하여 절리면의 방향을 추출하였고, 실제 클리노미터를 이용하여 얻은 절리 데이터와 동일 지역을 선정하여 비교, 분석하였다. 이때 절리 방향 데이터의 원활한 추출을 위해서 연구지역을 절리의 위치를 고려하여 연장성이 긴 절리가 끊어

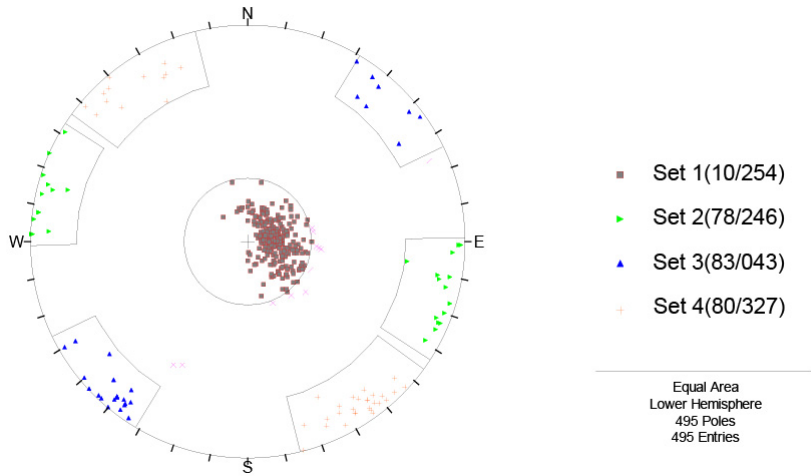
지는 것을 최소화하여 총 5개의 구역으로 나누어서 절리 방향 추출을 실시하였다. Figure 1은 총 5개의 구역을 항공사진에 표시한 것이다.

3.1 절리 방향 분석의 절차

각 구역의 점군 데이터를 Split-FX 프로그램에 입력시킨 후 노출된 절리를 추출할 수 있는 삼각요소망(Mesh)을 생성하였으며, 특정 삼각요소망과 그 주변의 여러 삼각요소망이 모여 하나의 패치(Patch)를 구성하는데 이를 하나의 절리로 볼 수 있다. 절리 각각의 경계를 구하기 위해서 하나의 삼각면을 선택하여 수직벡터를 계산하고 그 주변에 있는 삼각면들의 수직벡터와 방향을 비교하여 그 차이가 주어진 허용범위 안에 있을 때 하나의 패치로 결정한다. 이때 패치의 형성 여부를 결정할 때 필요한 삼각면의 방향 차이에 대한 허용범위를 직접 설정할 수 있는데 본 연구에서는 최소 10개 이상의 삼각요소망이 밀집되고, 10° 내의 방향 차이를 허용범위로 설정하여 절리를 추출하였다. 또한, 패치 기능을 이

Table 2. Joint orientation results (Dip / Dip Direction) from 3D methods

Division	Orientation (Dip / Dip Direction)	Amount (ea)
Set 1	10 / 254	263
Set 2	78 / 246	16
Set 3	83 / 046	22
Set 4	80 / 327	108
Total		409

**Fig. 2.** Stereonet for the automatic method in Split-FX (495 Poles)

용한 절리 추출뿐만 아니라 암반 내 절리 구조가 노출되지 않고 절리면의 일부분 혹은 절리가 선 모양으로 나타난 절리를 추출하기 위해서 점군 데이터와 현장 사진을 겹쳐 절리선(Trace) 기능을 이용하여 절리를 추출하였는데 이를 ‘사진 덧입힘’(Photo Draping or Texture Mapping)이라고 한다(Blythe, et al., 1999). 이를 통해 추출된 절리 중에서 현장에서 클리노미터를 이용하여 직접 측정한 절리 38개와 동일한 절리를 선정하였으며, 각각의 데이터를 매치시켜 절리 방향 데이터를 비교·분석을 실시하였고, 절리의 종류에 따라서 분석을 실시하였다.

3.2 3차원 모델링을 이용한 절리 방향 추출 결과

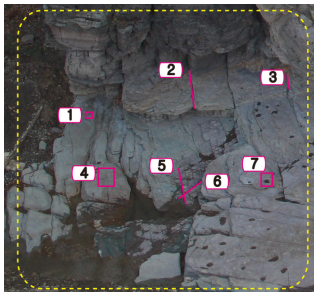
점군 데이터 분석 프로그램을 통해서 대상 사면의 절리를 추출한 결과 총 495개의 절리가 추출되었으며, 추출 결과 절리의 방향에 따라서 총 4 Set의 절리가 연구 지역에 발달되어 있음을 알 수 있었다. Table 2는 대상 사면에 발달한 절리를 절리군에 따라서 분류한 기준과 평균 절리방향이고, Figure 2는 495개의 절리 데이터를

평사투영망에 투영시킨 결과이다. 총 4개의 절리군은 수평으로 발달한 층리면(Set 1)과 암각화면과 수직으로 교차하는 절리면(Set 2, Set 3)과 암각화 면과 평행하게 발달한 절리면(Set 4)으로 구분할 수 있었으며, 방향(Dip / Dip Direction)은 각각 10/254, 78/246, 83/046과 80/327을 평균적으로 가지는 것을 알 수 있었다. 총 495개의 절리 중에서 4개의 절리군에 총 409개의 절리가 속하는 것을 알 수 있다. 절리들의 분포는 Table 2에 표시하였다. 나머지 86개의 절리는 불규칙한 절리라고 판단되었다.

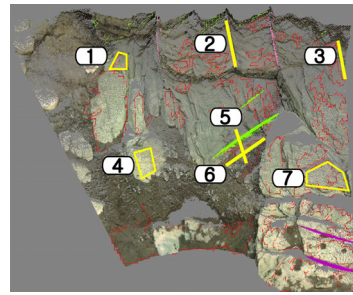
스테레오네트 상에서 확인한 결과 4개의 절리군이 명확하게 구분되는 것을 알 수 있었다. Set 1은 빨간색 사각형으로 표시되어 있으며, 많은 양의 절리가 Set 1에 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

3.3 절리 방향 데이터의 신뢰도 분석

앞에서 추출된 495개의 절리 데이터 중에서 현장에서 직접 측정한 40개의 절리와 동일한 절리를 선정하여 절리 방향을 직접 비교 분석하고 신뢰도를 분석하였다. Figure 3은 비교한 절리의 위치를 각 구역별로 표시한

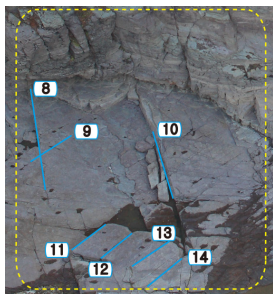


Clinometer Data

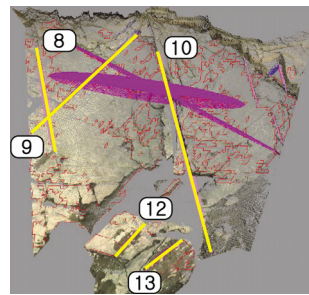


3D Laser Scanning Data

(a) Joint point measurements of Zone 1 (No. 1~7)

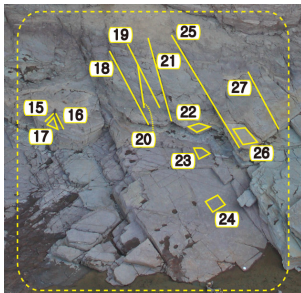


Clinometer Data

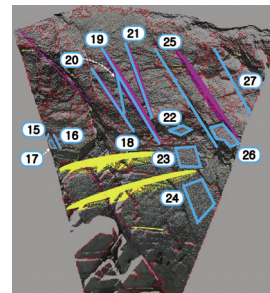


3D Laser Scanning Data

(b) Joint point measurements of Zone 2 (No. 8~14)

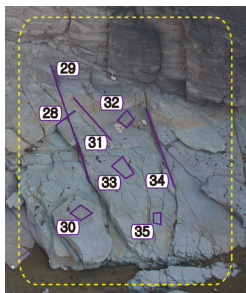


Clinometer Data

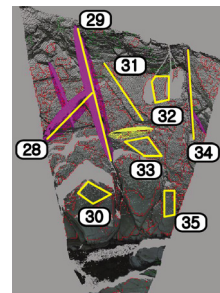


3D Laser Scanning Data

(c) Joint point measurements of Zone 3 (No. 15~27)



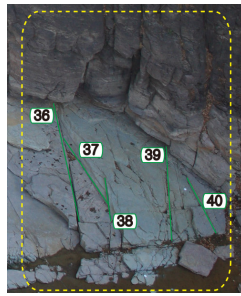
Clinometer Data



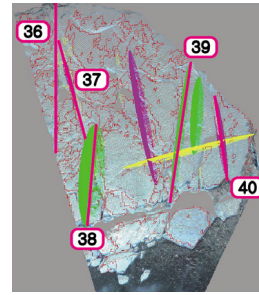
3D Laser Scanning Data

(d) Joint point measurements of Zone 4 (No. 28~35)

Fig. 3. Joint point measurements of Zones 1 to 5.



Clinometer Data



3D Laser Scanning Data

(e) Joint point measurement of Zone 5 (No. 36~40)

Fig. 3. Continued.

Table 3. Comparison of each joint orientation(Clinometer and 3D Laser Scanner)

(Unit : degree, °)

No.	Clinometer		3D Laser Scanner		Difference	
	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction
1	12	260	12	259	0	1
2	84	040	83	040	1	0
3	84	042	85	040	-1	2
4	9	200	13	204	-4	-4
5	85	033	85	029	0	4
6	86	281	79	281	7	1
7	12	269	12	286	0	-17
8	80	040	89	043	-9	-3
9	82	095	87	098	-5	-3
10	84	040	83	040	1	0
11	81	089		-		-
12	79	093	89	096	-10	-3
13	88	102	85	106	3	-4
14	82	094		-		-
15	83	098	87	103	-4	-5
16	82	040	90	040	-8	0
17	8	294	19	294	-11	0
18	81	035	81	036	0	-1
19	88	026	88	034	0	-8
20	88	046	90	047	-2	-1
21	87	053	88	050	-1	3
22	9	236	16	273	-7	-37
23	12	266	13	267	-1	-1
24	10	292	12	281	-2	11
25	77	217	73	217	4	0
26	18	265	12	274	6	-9
27	72	230	72	221	0	9
28	85	290	86	290	-1	0
29	71	235	72	237	-1	-2
30	6	268	10	255	-4	13
31	85	015	84	015	1	0
32	8	268	9	265	-1	3
33	6	268	6	253	0	15
34	87	056	87	060	0	-4
35	10	328	7	327	3	1

Table 3. Continued.

(Unit : degree, °)

No.	Clinometer		3D Laser Scanner		Difference	
	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction
36	86	061	81	060	5	1
37	50	052	78	044	-28	8
38	82	248	71	248	11	0
39	87	266	78	251	9	15
40	63	057	71	051	-8	6
Average Error					±4	±5

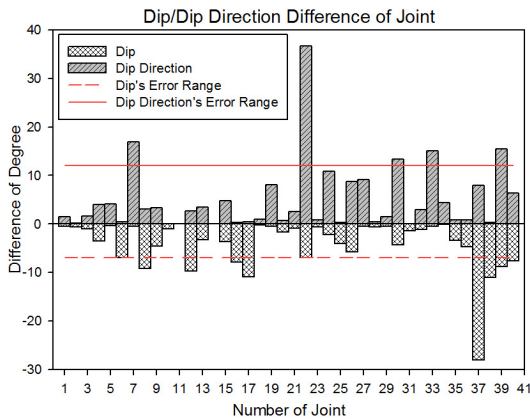


Fig. 4. Graph of total joint orientation error

그림이다.

Figure 3b에서 볼 수 있듯이 3D Laser Scanner를 통한 절리 데이터 추출에서 No. 11과 14는 토사로 가려져 있어서 데이터를 얻을 수 없었기 때문에 총 38개 지점을 비교 및 분석을 통하여 신뢰도 분석을 실시하였다. Ewan and West(1981)이 클리노미터의 조사자에 따른 경사와 경사방향의 측정 오차를 각각 ±5°와 ±10°라고 하였으며, 측정 장비는 ±1~2°의 기계 오차가 발생할 수 있다고 하였기 때문에 본 연구의 허용 오차범위를 경사는 ±7°, 경사방향은 ±12°로 설정하였다. Table 3은 38개의 절리의 경사/경사방향 데이터를 비교한 것으로 38개 데이터의 경사와 경사방향에 대한 오차의 평균은 Table 3에서 볼 수 있듯이 경사의 평균 오차는 ±4°이고, 경사방향의 평균 오차는 ±5°로 분석되었다. 38개의 자료에서 본 연구에서 설정한 허용 오차범위를 넘는 데이터는 총 12개이고 이 중에서 8개의 데이터가 경사의 허용 오차를 벗어나고, 경사방향의 허용 오차를 벗어나는 데이터는 5개이고, 특히 39번 절리는 경사와 경사방향 모두 허용 오차를 벗어나는 것으로 분석되었다.

경사와 경사방향의 오차를 편하게 확인하기 위해서

Figure 4와 같이 그래프로 38개의 오차를 표시하였는데, 경사는 (-)값으로 표시하였으며, 경사방향은 (+)값으로 표시하였다. 경사의 오차 중에서 가장 큰 오차를 가지는 절리는 37번 절리로 28°의 오차를 가지며, 경사방향의 경우 22번 절리가 37°의 오차를 가지는 것으로 분석되었다. 경사와 경사방향의 허용오차범위와 두 절리의 오차의 편차는 37번 절리의 경우 21°이고, 22번의 경우 25°의 편차를 가지기 때문에 경사와 경사방향의 최대오차의 편차는 경사방향의 편차가 더 크게 분석되었다. 허용 오차범위를 초과하는 오차들의 평균 편차를 분석하면, 경사의 평균 편차는 4.75°로 분석되었으며, 경사방향의 경우 7.4°로 분석되었는데 이를 통해서 경사보다 경사방향의 편차가 더 크다는 것을 알 수 있었다. 하지만 전체 38개의 자료 중에서 경사의 경우 전체 자료에서 79%의 자료가 허용 오차범위 안에 들고 경사방향의 경우 87%의 자료가 허용 오차 범위 안에 들었다.

3.4 오차 원인 분석

38개의 절리자료를 비교·분석한 결과에서 오차가 큰 절리를 이용하여 오차의 원인을 분석하였다. 클리노미터와 3D Laser Scanner를 이용한 절리의 방향을 비교하였을 때 오차가 발생하는 가장 큰 요인은 절리면의 굴곡도와 측정 방법의 차이로 판단된다. Figure 5는 3D 모델에서 추출한 No. 22 절리의 단면으로 단면 A-A'는 반구대암각화를 기준으로 하였을 때 반구대 암각화와 수직으로 자른 단면이고, 단면 B-B'는 반구대암각화와 수평으로 자른 단면이다.

빨간 실선은 프로그램을 통해 추출된 22번 절리로 그림에서 보이는 것과 같이 프로그램을 통해서 절리의 방향을 추출할 때 절리의 평균적인 굴곡도를 기준으로 절리의 방향을 추출하지만, 클리노미터를 이용하여 절리의 방향을 직접 측정하는 경우에는 절리의 면적이 100 이라면 측정하는 면적은 1~5 정도의 작은 면적을 측정하였기 때문에 두 측정 결과의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 직접 측정을 하는 경우에는 넓은 판

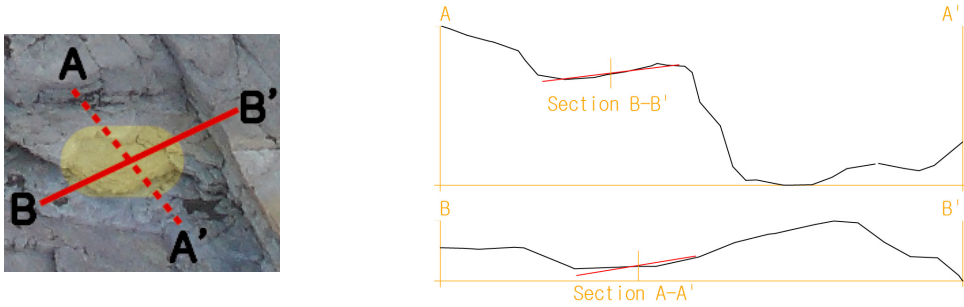


Fig. 5. Error analysis by waviness (Bedding)

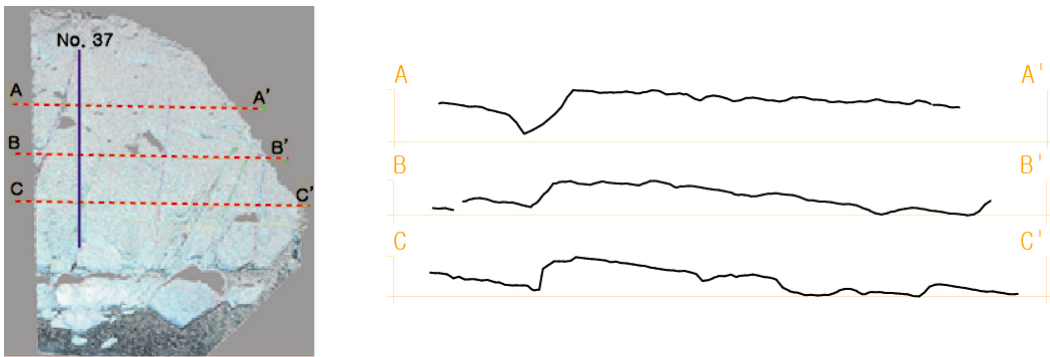


Fig. 6. Error analysis by measurement position (High persistence joint)

을 이용하여 굴곡도의 영향을 최소한으로 줄여서 측정하거나 절리를 3지점 이상 측정하여 평균값을 내는 방법을 사용하면 오차를 줄일 수 있다고 판단된다. 3D Laser Scanner를 사용하여 점군 데이터를 얻을 때 점들의 간격과 가림 현상으로 인한 데이터 손실을 최소화하고, 여러 지점에서 측정을 하거나 여러 시기에 걸쳐 측정을 하는 경우에는 동일한 거리를 유지하여야 점군 데이터의 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

수직 절리의 경우에도 같은 원인으로 오차가 발생한다고 판단되었다. Figure 6는 연장성이 긴 37번 절리에서 A-A', B-B'와 C-C'의 단면의 위치와 단면도를 나타내었다. 3개의 단면을 살펴보면 A-A'에서 C-C'으로 갈수록 절리의 경사가 90°에 가까워지는 것을 알 수 있는데, 이는 현장에서 한 지점만 측정하였을 경우 절리의 방향이 크게 차이가 날 수 있다는 점을 나타내는 것이다. 3D Laser Scanner의 경우에는 층리면과 동일하게 절리의 일부가 아닌 전체의 방향성을 평균값으로 측정하기 때문에 절리의 연장성이 긴 경우에는 두 측정법의 차이로 인해서 오차가 크게 발생 할 수 있다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 암반 절리 조사방법의 한계점을 보완할 수 있는 새로운 조사방법의 하나인 3D Laser Scanner를 이용하여 절리의 방향성을 자동으로 추출하였으며, 직접 측정한 절리 방향 데이터 38개와의 비교를 통하여 3D Laser Scanner를 이용한 절리 방향 측정의 신뢰도에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 3차원 모델에서 자동 추출한 절리는 총 495개이고, 절리의 방향에 따라서 수평으로 발달한 층리면, 암각화면에 수직으로 교차하는 두 종류의 수직절리와 암각화면과 평행하게 발달하는 수직절리와 같이 총 4개의 절리군이 연구지역에 발달되어 있었으며, 각 절리군의 평균 방향은 10/254, 78/246, 83/046과 80/327로 측정되었다.
2. 연구대상 지역을 클리노미터로 직접 측정한 38개의 절리 방향 데이터와 3D Laser Scanner를 통해 추출된 절리 방향 데이터를 비교·분석한 결과 경사는 $\pm 4^\circ$, 경사방향은 $\pm 5^\circ$ 내외의 편차가 발생하였으며, 본 연구

에서 설정한 경사/경사방향의 허용 오차범위인 $\pm 7^\circ$, $\pm 12^\circ$ 를 초과하지 않았기 때문에 본 연구 결과는 신뢰할만한 수준의 자료로 판단된다.

3. 오차 원인을 분석한 결과 절리의 굴곡도와 측정 위치 및 측정 방법의 차이로 인해서 오차가 발생한 것으로 분석되었다. 특히, 클리노미터를 이용하여 절리 방향을 직접 측정하는 경우에는 위의 3가지 요인에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. 이를 최소화하기 위해서는 직접 측정하는 경우에는 절리 전체 면적에 비례하여 여러 지점을 측정하여 절리 방향의 평균을 산출하거나, 넓은 판을 이용하여 굴곡도를 완화시켜 측정하는 방법을 사용하면 절리 방향의 오차를 줄일 수 있다. 3D Laser Scanner를 이용하여 절리 방향을 추출하는 경우에는 절리면 편평도의 허용 범위를 실제 절리면과 가장 유사한 값을 가질 수 있도록 조정하여야 자료의 신뢰성을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단된다.
4. 3D Laser Scanner를 이용한 절리 측정법과 기존 측정법의 조사시간이 모두 약 3시간 정도 소요되었는데, 3D Laser Scanner를 이용하였을 때 12배 이상의 자료를 획득할 수 있었기에 효율적이라는 것을 본 연구를 통해서 확인할 수 있었다. 또한, 기존 절리 조사법의 단점인 지형적 제약의 문제점을 해결할 수 있으며, 조사자의 안정성을 확보하여 조사의 효율성을 극대화할 수 있다고 판단되었다. 마지막으로 3D Laser Scanner를 통해 측정된 자료는 컴퓨터 파일로 남아있기 때문에 터널이나 사면 보강 공사 후에도 조사된 자료로 체계적인 사면 관리가 가능하고, 사면 붕괴가 발생하였을 때 신속하고 정확한 대안을 강구하는 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

이번 연구를 통해서 3D Laser Scanner를 이용한 절리 방향 데이터의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 그러나 추출된 자료를 활용하기 위해서는 조사자의 경험이나 숙련도 등에 따라서 신뢰성이 달라질 수 있기 때문에 3D Laser Scanner를 이용하여 절리를 자동으로 추출하는 기능에서 중요 절리 설정과 빈도수 조절에 대한 추가적인 연구가 이루어진다면 3D Laser Scanner를 이용한 절리 조사의 신뢰도를 높여 앞으로 암반 사면 절리 조사에 3D Laser Scanner의 활용이 활성화 될 것이라고 생각된다.

사 사

이 논문은 2013년도 서울시립대학교 교내학술연구비

에 의하여 작성되었습니다.

References

1. Boehler, W. and Marbs, A., 2002, 3D Scanning Instruments, In Proceedings of the CIPA WG6, International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Ziti, Thessaloniki, 9-18.
2. Blythe, D., McReynolds, T., Grantham, B and Nelson, S., 1999, Advanced Graphics Programming Techniques Using OpenGL Siggraph.
3. Ewan, V. J. and West, G., 1981, Reproducibility of joint orientation measurements in rock, Transport and Road Research Laboratory supplementary report 702, 18P, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 19.4, 94.
4. Hagan, T. O., 1980, A case of terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 17, 191-198.
5. Kim, C. H. and Kemeny, J., 2008, Automatic Extraction of Fractures and Their Characteristics in Rock Masses by LIDAR System and the Split-FX Software, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 19.1, 1-10.
6. Park, E. H., 2010, Research about the analysis of the characteristics and the stability on rock slope using terrestrial LiDAR, MSc thesis, Pai Chai University.
7. Park, S. H., 2015, A study on reliability of joint orientation measurements in rock slopes using 3D laser scanner, MSc thesis, Department of Civil Engineering, University of Seoul.
8. Park, H. D. and Jeong, C. Y., 2003, DEM generation of Rock Slope using Laser Scanning and Digital Stereo Photogrammetry, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Korean Society for Rock Mechanics, 13.3, 207-214.
9. Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, London.
10. Reid, T. R. and Harrison, J. P., 2000, A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 37.7, 1073-1089.
11. Ryu, D. W., Lee, Y., Chang, Y. S., Lee, H. K. and Park, H. D., 2000, Rock Joint Survey System by image Processing and Stereophotogrammetry, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 10.3, 329-343.
12. Shin, S. M., 2005, A study on the analysis of discontinuity in the rock-mass by 3D laser scanner, MSc thesis, Pai Chai University.
13. Slob, S. and Hack, R., 2004, 3D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique, Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe, 104, 179-189.

- 14. Slob, S., Hack, R. and Turner, A. K., 2002, An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques, ISRM International Symposium on Rock Engineering For Mountainous Regions, 87-94.
- 15. Yue, B. M., Park, U. Y. and Yang, I. T., 1983, Theoretical Research on Photogrammetric Dip and Strike Determination of Inclined Surfaces, Journal of Korea Society of Civil Engineers, 3.3, 129-135.
- 16. Split Engineering, 2010, Split-FX (Point Cloud Processing Software : Version 2.0), Split Engineering LLC., Tucson, Arizona, USA.
- 17. Leica Geosystems, 2009, Leica ScanStation 2, Product information and specifications, Leica Geosystems AG., Heerbrugg, Switzerland.



박 선 현

2013년 아주대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 2015년 서울시립대학교 대학원 토목공학과 공학석사

Tel: 010-7665-3230
 E-mail: park52p@naver.com



이 벽 규

1977년 고려대학교 이과대학 지질학과 이학사
 2004년 서울시립대학교 대학원 토목공학과 공학석사
 2007년 서울시립대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 070-8841-2400
 E-mail: saeter20@kornet.net
 현재 (주)지오메카이엔지 회장



이 수 곤

1980년 고려대학교 이과대학 지질학과 이학사
 1982년 영국 Lees대학교 대학원 토목지질공학 이학석사
 1987년 Imperial College London 토목지질공학 이학박사

Tel: 02-6490-2429
 E-mail: sglee@uos.ac.kr
 현재 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수



김 치 환

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

Tel: 630-290-1468
 E-mail: kimcheen@korea.com
 현재 우석대학교 토목공학과 교수