

암반 불연속면 특성 조사를 위한 RPAS LiDAR 데이터의 활용

이병석¹, 고건우^{2*}

¹전북대학교 토목공학과, ²주식회사 디프리

Utilization of RPAS LiDAR Data to Investigate Rock Mass Discontinuity Characteristics

Byung Suk Lee¹, Kun Woo Ko^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University

²D.PRE. Inc.

요약 사회기반시설물중 암반 사면은 붕괴 발생 시 대량의 피해가 발생하기에, 주요 붕괴인자인 불연속면의 특성 파악은 매우 중요한 문제이다. 불연속면의 특성 파악을 위해서는 직접적인 조사 방법인 윈도우법, 스캔라인법 등이 활용되고 있다. 그러나 조사 수행에는 안전성, 정확성, 객관성, 편의성 문제가 있기 때문에 최근 RPAS를 활용하는 방안이 대대적인 연구가 진행되고 있다. 논문의 구성은 첫 번째로 포인트클라우드를 활용하여 불연속면의 분류와 경사, 경사 방향의 추출에 대해 검토하였고, 두 번째로는 분류된 불연속면 패치에서 추출된 JRC와 프로파일계이지의 결과를 비교 검토하였다. 검토 결과 불연속면의 경사에서는 0.24° ~ 0.7°의 차이를 보였고, 경사 방향에서는 3.50° ~ 10.83°의 차이를 나타냈다. 이러한 차이는 RPAS LiDAR의 데이터 획득 오차와 암반 표면의 거칠기에 따라 발생된 것으로 사료되며, 본 연구 결과를 활용하기 위해서는 향후 불연속면의 분류를 위한 다양한 알고리즘 적용, 다양한 현장 조사 결과 비교 검토 등의 후속 연구가 필요한 것으로 나타났다. 또한, 포인트클라우드를 활용하여 Barton의 JRC를 이미지 추출법을 사용하여 길이 비율로 정량화 시켰고, 이를 통한 현장의 JRC와 포인트클라우드를 활용한 JRC의 오차는 0.14 ~ 0.51로 나타났다.

Abstract Rock slopes among social infrastructures cause a large amount of damage when a collapse occurs, so it is very important to identify the characteristics of discontinuities, which are major collapse factors. In order to identify the characteristics of a discontinuity, the window method and the scan-line method are direct investigation methods that have been used in the past. However, since there are safety, accuracy, objectivity, and convenience issues in conducting surveys, many studies have been conducted on how to utilize RPAS recently. The classification of discontinuities and the extraction of slopes and directions of slopes were reviewed using a point cloud, and the results of JRC and profile gauges extracted from classified discontinuity patches were compared and reviewed. The slope of the discontinuity showed a difference of 0.24 to 0.7°, and the slope direction showed a difference of 4.93 to 10.83°. These difference are considered to be caused by the data acquisition error of RPAS LiDAR and the roughness of the rock mass surface. In order to utilize the results of this study, it appears that follow-up studies such as application of various algorithms for classification of discontinuities and a comparative review of various field survey results are necessary in the future. In addition, using a point cloud, Barton's JRC was quantified as a length ratio using the image extraction method. The error between the JRC in the field and the JRC using the point cloud was found to be 0.14 to 0.51.

Keywords : RPAS, Rock Slope, Discontinuities, JRC, Stereonet, RPAS LiDAR, Point Cloud

본 논문은 창업진흥원 "창업중심대학 초기 지원사업"으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kun Woo Ko(D.PRE Inc.)

email: dpreofficial@naver.com

Received July 12, 2023

Revised August 7, 2023

Accepted August 10, 2023

Published August 31, 2023

1. 서론

우리나라는 국토 면적의 대다수가 산악지형으로 국토 개발과 사회기반시설 구축을 위해서는 수많은 절토 사면이 형성된다. 과거와 다르게 최근 기술의 발달과 인구 과밀 현상은 인간의 주거 영역의 확장을 불러일으켰다. 이러한 주거 확장은 산사태 및 사면의 붕괴의 위협으로부터 노출시키게 되었고, 이를 관리하는 지자체 및 공공기관에서 사면 관리에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 이중 암반 사면은 붕괴 발생시 인명 및 재산 피해 규모가 토사 사면과 비교하였을 때 크기 때문에 체계적이고 정확한 관리가 요구된다.

암반 사면의 파괴는 주로 불연속면의 방향성과 파괴 특성에 의해 지배되기 때문에 불연속면에 대한 특성 파악은 매우 중요하다. 암반의 불연속면 특성 파악은 클리노컴퍼스를 이용하여 윈도우법, 스캔 라인법 등을 통해 수행된다. 그러나 기존의 조사 방법을 수행하기 위해서는 많은 한계점이 존재한다. 대표적인 문제로는 객관적이고 정확한 결과, 조사 접근성, 조사자의 안전 문제, 전체적인 조사에 필요한 시간 소요 문제가 있다. 특히, 조사자의 안전 문제는 작업간 안전 문제와 조사 수행 간 안전 관리를 위한 교통차단 시 줄음운전 등으로 인한 조사 작업자의 안전사고 위험이 있다.

이를 해결하기 위해 수많은 연구자들은 LiDAR (Light Detection And Ranging) 혹은 사진촬영을 통해 생성된 포인트클라우드를 활용하는 방안이 대두되고 있으며, 이에 대한 연구가 국내외에서 수행되고 있다[1-12]. 이 중 지상 LiDAR를 활용해 이를 분석하여 암반 불연속면 특성을 획득하는 연구가 주를 이루고 있다. 이는 지상 LiDAR는 과거 대비 장비 가격이 저렴해졌고 mm단위의 정밀도를 갖기 때문이다. 그러나 지상 LiDAR의 한계성도 명확한데, 터널에 적용하기에는 적합하지만 수십 m 높이의 암반 사면에 적용하기에는 장비와 대상물간 높이 차이로 누락되는 영역의 데이터가 존재하며, 도로의 특성상 근접된 위치에서 데이터 획득해야하는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 최근에는 RPAS(Remotely Piloted Aircraft System) 혹은 드론(Drone), UAV(Unmanned Aircraft Vehicle)을 이용해 사진 촬영 이미지를 증첩한 방안이 대두되고 있다. 그러나 이 방법 또한 현장 적용에서 데이터 증첩 처리 시간, 현장 촬영 시간이 많이 소요되어 실질적인 안전사고 문제 해결에는 큰 대

안이 아니다. 따라서 RPAS에 LiDAR를 장착하는 것이 실질적인 대안으로 판단된다.

LiDAR를 이용한 불연속면 특성 조사를 위해서는 획득된 포인트클라우드에서 불연속면 추출 과정이 중요하며, 적용되는 불연속면 추출 알고리즘에 따라 결과가 상이하게 나타나 기존의 조사 방법을 완전히 대체할 만큼의 신뢰성을 확보하지 못해 현장 적용에는 어려운 문제가 있다[4,5]. 하지만 접근이 어려워 직접적인 조사 결과를 누락하는 것보다는 이를 활용하는 방안이 좋고, 조사자 주관적인 판단 보다 전체 암반사면 내 존재하는 모든 불연속면에 대한 정보를 활용할 수 있는 큰 장점이 있다.

이러한 장점에도 불구하고 현재 연구가 활발하게 진행되고 있는 국외와는 다르게 국내에서는 포인트클라우드를 활용한 암반 사면 특성 조사 연구에 대한 사례 연구가 적으며, RPAS LiDAR로 획득된 포인트클라우드 데이터를 분석하기 위해서는 지상 LiDAR와는 다른 알고리즘을 적용할 필요성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 암반 사면의 불연속면 조사의 어려움을 해결하기 위해 RPAS LiDAR를 활용하여 불연속면 특성 분석 방법에 대해 평가하고자 한다. 평가 방법으로는 MATLAB 기반의 불연속면 분석 알고리즘을 이용한 출력 결과와 실제 현장 측정 결과를 비교하였다. 연구 방법은 Fig. 1과 같다.

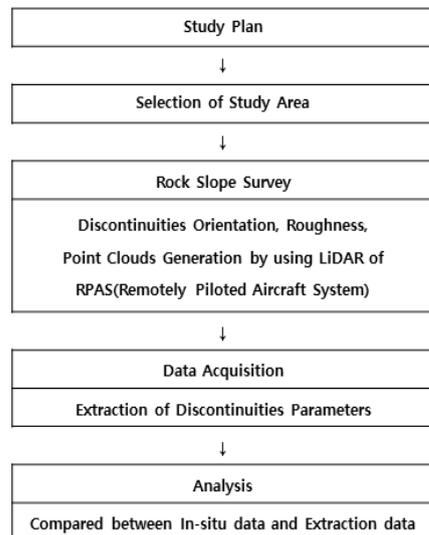


Fig. 1. Flow chart of this study

2. 데이터 취득

본 연구에서는 암반 사면의 불연속면 특성 조사에 필요한 포인트클라우드 데이터 취득을 위해 연구대상지로 충청남도 논산시 일원의 국도에 노출되어 있는 암반 사면을 선정하였다.

연구대상지는 2차선 도로로 교통량이 적고 접근성이 높아 직접 조사와 포인트클라우드 데이터 분석 결과를 비교하기에 적합할 것으로 판단하여 선정하였으며, 드론 민원신청 서비스를 통해 비행신고와 사진 촬영에 대한 허가 후 데이터를 취득하였다. Fig. 2는 연구대상지를 나타낸다.



Fig. 2. Site on this study

암반 사면의 포인트클라우드 데이터 취득을 위해 RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)에 장착된 Zenmuse L1 LiDAR 카메라를 활용하였으며, 장비 제원 관련 사항은 Table 1과 같다. 포인트클라우드의 GPS 위치 정보의 정확성을 위해 촬영 전 IMU(Inertial Measurement Unit)장치의 캘리브레이션을 수행하였고, Fig. 3-5 그림의 장비를 통해 실시간 차분 보정 보정 기능을 제공하는 D-RTK2 고정밀 GNSS(Global Navigation Satellite System)모바일 스테이션을 활용하여 정확도를 향상시켜 cm급 정밀 포지션 데이터를 획득하였다.



Fig. 3. High Precision GNSS Mobile Station (Manufactured by DJI)



Fig. 4. ZENMUSE L1 (LiDAR Camera)(Manufactured by DJI)



Fig. 5. Application of the High Precision GNSS Mobile Station in-situ

Table 1. Specification of ZENMUSE L1

Equipment		Description
ZENMUSE L1	Ranging Accuracy	3 cm × 100 m
	Distance	50m
	FOV	70.4° × 77.2°
	Weight	930±10 g
IP		54

포인트클라우드 획득 시 드론 윈스톱 민원서비스의 비행승인, 사진 촬영 허가 완료하였으며, 작업간 안전을 위해 안전장비와 혹시 모를 안전사고를 대비하여 교통 통제 하에 촬영을 진행하였다. 또한, 조사 결과와 비교할 수 있는 현장 조사 결과를 얻기 위해 Fig. 6처럼 사다리를 이용하여 접근한 후 클리노컴퍼스와 프로파일게이지를 이용하여 불연속면 경사 방향, 경사와 거칠기를 정보를 조사하였다.

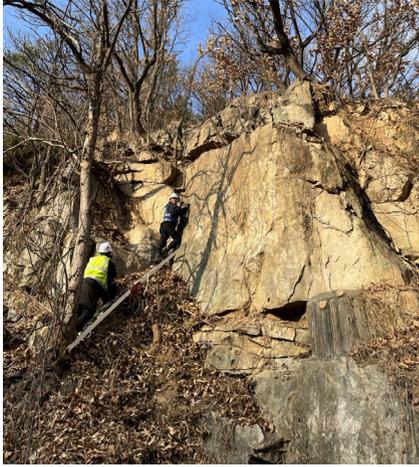


Fig. 6. Survey of discontinuities

3. 데이터 처리 및 분석

3.1 방향성 데이터 처리 및 정확도 평가

LiDAR를 통해 획득된 포인트클라우드 데이터는 DJI사의 Terra 소프트웨어를 이용하여 LAS 파일형식으로 변환하였다(Fig. 7). 이중 직접 조사가 수행 가능 영역을 따로 추출하여 데이터 처리를 수행하였고 Fig. 8의 데이터 처리 과정을 거쳐 Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.



Fig. 7. Cloud data on Rock slope points

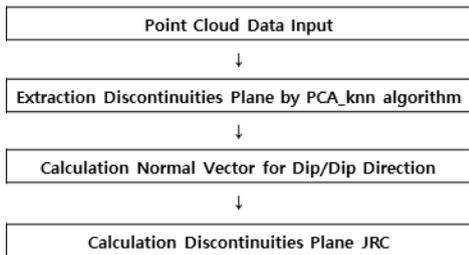


Fig. 8. Data Processing Process and Result

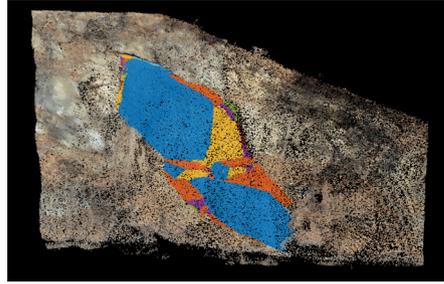
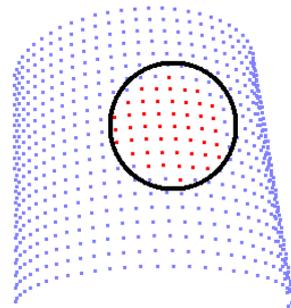


Fig. 9. Data Processing Result

포인트클라우드 데이터를 가지고 불연속면 특성을 추출하기 위해서는 수 백만개 가량의 불규칙한 점군 데이터에서 동일 평면에 위치하는 점군 데이터의 분류 작업이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 Knn알고리즘(Fig. 10(a))을 사용하여 평면성 분류 작업을 수행하였다. Knn 알고리즘은 유클리드 거리를 계산하여 임의의 점 중심을 기준으로 인접한 점군 K개를 찾아 분류하는 것으로, RPAS LiDAR를 통해 얻어진 불규칙한 포인트클라우드를 1차적으로 분류하고자 사용하였다. 이후 방향성 정보를 추출하기 위해 분류된 동일 평면내에 위치한 점군 데이터에서 각 각의 점에 대해 PCA(Principal Component Analysis)를 적용하여 법선 벡터를 생성하였다(Fig. 10 (a)). 앞선 과정 결과 무수히 많은 포인트클라우드 데이터에서 동일 평면에 위치한 점들을 점군으로 분류하여 불연속면을 결정할 것이다. 이후 법선 벡터의 방향성 정보를 스테리오 넷에 투영하였고, 분류된 면에 해당된 불연속면을 대표로 하는 경사/경사 방향을 추출하였다(Fig. 11).



(a) Knn algorithm

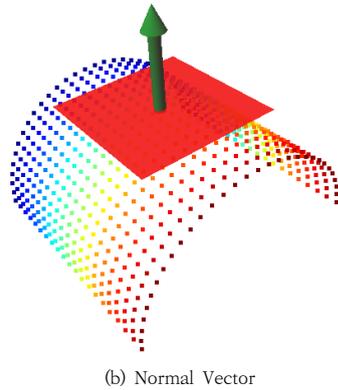


Fig. 10. Data Processing Result in Streonet

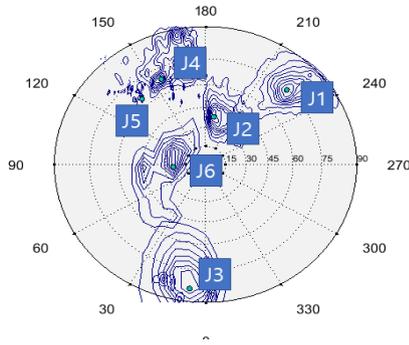


Fig. 11. Data Processing Result in Stereonet

Fig. 12는 현장에서 클리노컴퍼스를 이용해 취득한 경사/경사방향 결과로, 본 연구에서 제안된 알고리즘을 통해 추출된 경사/경사방향을 비교하고자 3D 모델링 자료와 실제 암반 사면을 보여준다.

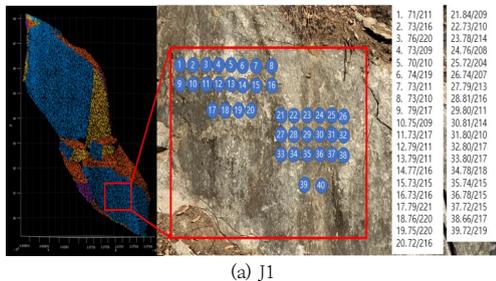


Fig. 12(a). Compared dip/dip direction results between in-situ data and Extraction data

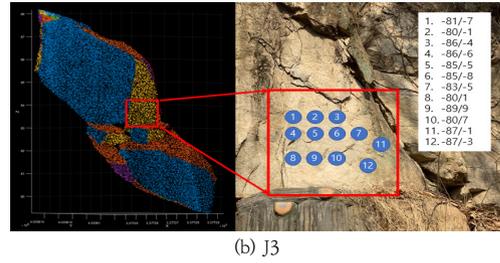


Fig. 12(b). Compared dip/dip direction results between in-situ data and Extraction data

현장에서 클리노컴퍼스를 이용한 조사 결과와 포인트 클라우드를 활용하여 추출한 결과를 서로 비교한 결과 경사의 경우 0.7°, 0.24°로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 그러나 경사 방향의 경우 10.83°, 3.50°로 편차를 보이는 것으로 나타났다. 본 결과는 RPAS LiDAR를 통한 불연속면의 조사 결과를 활용하기에는 개선사항이 필요한 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과를 나타낸 가장 큰 원인으로는 Fig. 14를 통해 설명할 수 있다. Fig. 13은 RPAS LiDAR를 통해 얻어진 포인트클라우드 데이터의 예시로 평면내에 위치한 포인트클라우드이다. 지상 LiDAR와 다르게 RPAS LiDAR는 비행으로 인해 고정되지 않은 상태로 데이터를 취득하게 되고 이는 동일 평면이어도 편차를 갖는 데이터를 획득하게 된다. 따라서, 경사/경사 방향에 대한 차이는 인해 발생한 것으로 모든 점에 대한 법선 벡터에서 대표 방향성을 추출하는 과정에서 오차가 발생한 것으로 사료된다.

또한 이러한 오차 발생은 암반의 표면의 거칠기의 문제와도 연관이 있다. 포인트클라우드는 모든 점의 법선 벡터를 계산하여 경사/경사 방향을 추출한다. 하지만 클리노컴퍼스를 사용한 조사시 클리노컴퍼스가 닿는 조사 면적에는 수십개의 포인트클라우드 데이터가 존재하게 된다. 따라서 실제 현장 조사 결과와 비교할 경우 일부 오차가 존재하는 것은 당연한 결과로 사료되고 이는 거칠기가 심한 암반을 대상으로 할 경우 더욱 발생할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 RPAS LiDAR를 통하여 불연속면 특성 조사의 초기 시도를 주목적으로 한 개소의 현장에 대하여 분석을 수행하였고, 향후 다양한 암반 사면에 적용하고 비교 검토 혹은 다른 알고리즘을 통한 불연속면 분류 방법, 정확성 비교 검토 등의 후속 연구가 필요하다.

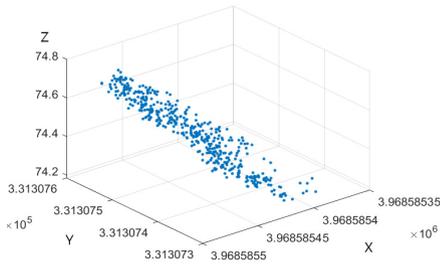


Fig. 13. Point Cloud Data by RPAS LiDAR

Table 2. Comparison dip/dip direction

Patch No.		In situ Data	Extraction Data	Difference
J1	dip	75.70°	75.00°	0.70°
	dip direction	214.00°	224.83°	10.83°
J3	dip	-84.08°	-84.32°	0.24°
	dip direction	1.75°	-1.75°	3.50°

3.2 거칠기 데이터 처리 및 정확도 평가

앞 절에서는 포인트클라우드 데이터를 처리하여 불연속면을 분류하고 경사와 경사 방향 데이터 처리에 대해 서술하였다. 본 절에서는 분류된 불연속면의 패치에 대하여 강도와 관련성이 깊은 거칠기 계수인 JRC(Joint Roughness Coefficient) 데이터를 처리하고 추출된 결과값으로 정확도를 평가하고자 하였다.

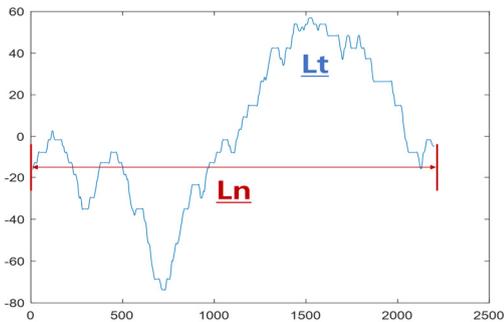


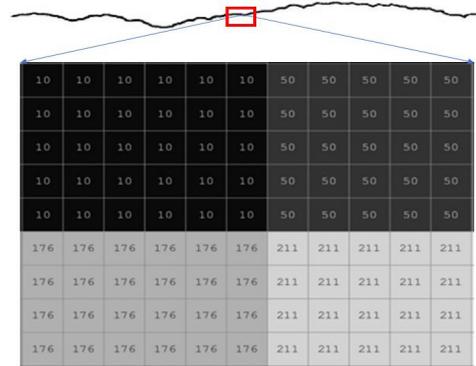
Fig. 14. L_n and L_t on sampled data

데이터 추출에는 Barton(1977)이 제안한 JRC 계수 [6]를 이미지 추출 작업을 통해 Fig. 14와 같이 정량화된 길이의 비인 L_s 값을 결정하여 JRC를 결정하였고 수식은 아래와 같다.

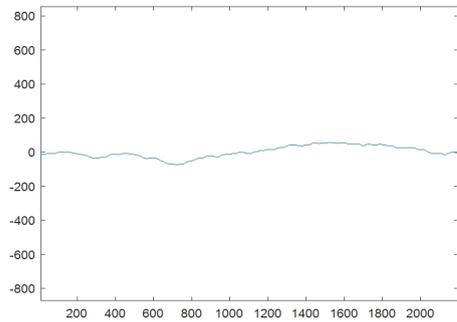
$$L_s = \frac{L_t}{L_n} \tag{1}$$

Where, L_t Extension Length, L_n Initial Length

Barton이 제안한 JRC 계수에서 정확한 길이의 비율을 찾기 위해 gray scale의 임계값(Fig. 15 (a))을 이용한 이미지 추출방법을 사용하였고(Fig. 15 (b)), 본 연구에서 사용된 임계값은 50으로 설정하였다.



(a) Exampled of gray scale by Barton JRC



(b) Result of extracted to Barton JRC by using gray scale

Fig. 15. Exampled of JRC extraction

Table 3. Comparison JRC

Patch No.	In situ Data	Extraction Data	Difference
J1 JRC	9.05	8.91	0.14
J3 JRC	9.6	10.14	0.54

추출된 패치에 대한 예시는 Fig. 16과 같이 불연속면의 경사면을 따라 추출하여 비교하였고, 비교 결과 0.14와 0.54 정도의 JRC 계수 값의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 분석에서 JRC 계수에 대한 추출 방법의 중요 인자로는 포인트클라우드의 간격에 따라 JRC 계수

에 대한 인자가 변화하는 점이 있기 때문에 현재 JRC 추출에 포인트클라우드의 활용은 한계성을 가지고는 있다. 이는 향후 과학기술의 발전으로 LiDAR 센서의 제원이 발전한다면 이를 개선할 수 있을 것으로 판단되었고, 본 연구를 통해 포인트클라우드 데이터를 활용하여 암반 사면의 유지 관련 업무에 활용이 가능할 것으로 사료되며 이를 활용 시 업무의 편의성 증대 효과를 가질 것으로 기대된다.

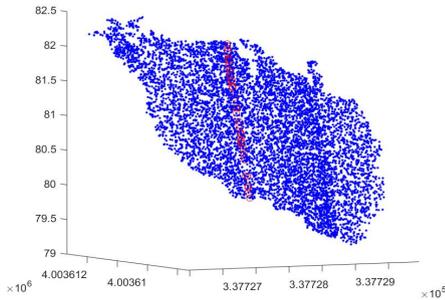


Fig. 16. Extraction of JRC by Discontinuities and Sampled Example from it

4. 결론

본 연구는 암반 사면에 대한 유지관리 방안으로 RPAS LiDAR를 활용하여 포인트클라우드 데이터를 통해 불연속면 특성 조사에 활용에 대한 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. RPAS에 장착된 LiDAR 카메라를 통해 암반 사면에 대한 포인트클라우드 데이터를 취득하고, 데이터 처리를 통해 암반 사면에 대한 불연속면 설계 인자들을 효과적으로 추출할 수 있었다.
2. 포인트클라우드를 통해 추출된 데이터 중 불연속면의 경사, 경사 방향에 대해 정확성 검증을 위해 현장 측정 데이터와 추출된 결과를 비교하였다. 비교 결과 경사는 0.24° ~ 0.7°의 차이로 나타났고, 경사 방향의 경우 3.50° ~ 10.83°의 차이를 나타냈다. 이와 같은 차이는 RPAS LiDAR의 데이터 획득 오차로 인한 문제와 암반 표면의 거칠기가 주원인으로 사료되며, 향후 다양한 현장 조사 결과 비교와 불연속면 분류를 위한 다양한 알고리즘을 통한 후속적인 연구가 필요하다.
3. 포인트클라우드를 통해 Barton이 제시한 JRC를 추출하여 활용 가능성과 정확성을 검증하였고, 비

교 결과 0.14 ~ 0.54 정도의 JRC의 차이를 나타냈다. 허나 본 연구 결과에서 사용된 JRC 데이터 처리 방법은 2cm 간격을 갖는 포인트클라우드 데이터를 활용하였으며 향후 센서 기술을 발전으로 보다 조밀한 점간격을 측정할 수 있다면 활용 가능성이 높을 것으로 사료되었다.

4. 본 연구 결과 암반 사면의 유지 관리에 RPAS LiDAR를 통해 불연속면 특성 조사에 활용성이 높은 것으로 판단되며, 장비의 성능 향상과 함께 이를 유지관리 업무에 활용한다면 업무 편의성 증대 효과를 가질 것으로 기대된다.

References

- [1] Han, X., Yang, S., Zhou, F., Wang, J., Zhou, D., "An effective approach for rock mass discontinuity extraction based on terrestrial LiDAR scanning 3D point clouds", Ieee Access, Vol. 5, pp.26734-26742, May, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2771201>
- [2] Kemeny, J., J. Donovan, "Rock mass characterisation using LIDAR and automated point cloud processing." Ground Engineering Vol. 38, pp.26-29, November, 2005.
- [3] Lato, M., et al., "Rock bench: Establishing a common repository and standards for assessing rockmass characteristics using LiDAR and photogrammetry." Computers & Geosciences Vol. 50, pp.106-114, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.014>
- [4] S. D. Lee, S. W. Jeon, "A Study on the Roughness Measurement for Joints in Rock Mass Using LIDAR", Tunnel and Underground Space, Vol. 27, No. 1, pp. 58-68, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7474/TUS.2017.27.1.058>
- [5] H. W. Lee., B. R. Lee., S. W. Choi., "Technical Development for Extraction of Discontinuities in Rock Mass Using LiDAR" Tunnel and Underground Space, Vol. 31, No. 1, pp. 10-24, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7474/TUS.2021.31.1.010>
- [6] Barton. N., Choubey. V., "The shear strength of rock joints in theory and practice", Rock Mechanics, Vol. 10, 1-54, 1977.
- [7] Riquelme. A. J., Abellan. A., Tomas. R., Jaboyedoff. M., "A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds." Computers & Geosciences, Vol. 68, pp.38-52, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>
- [8] Kong. D., Wu. F., Saroglou. C., "Automatic identification and characterization of discontinuities in rock masses from 3D point clouds", Engineering

Geology, Vol. 265, pp.105442, 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105442>

- [9] S. D. Lee, S. W. Jeon, "A Study on the Extraction of Slope Surface Orientation using LIDAR with respect to Triangulation Method and Sampling on the Point Cloud", Tunnel and Underground Space, Vol. 26, No. 1, pp.46-58, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7474/TUS.2016.26.1.046>
- [10] Guo. J., Zhang. Z., Mao. Y., Liu. S., Zhu. W., & Yang. T., "Automatic Extraction of Discontinuity Traces from 3D Rock Mass Point Clouds Considering the Influence of Light Shadows and Color Change", Remote Sensing, Vol. 14, Iss. 22, pp.5314, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14215314>
- [11] S. S. Kim et al., "Quality Assessment of Three Dimensional Topographic and Building Modelling using High-performance RTK Drone", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 24, No. 5 pp.11-19, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.5.11>
- [12] J. K. Park. and K. W. Lee., "Individual Tree Detection and Modeling using Terrestrial and Drone-mounted Laser Scanners", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 23, No. 11 pp.36-41, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.11.36>

고 건 우(Kun-Woo Ko)

[정회원]



- 2015년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2023년 8월 : 전북대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2022년 10월 : 주식회사 디프리 (대표이사)

<관심분야>

지반공학, 지구물리탐사

이 병 석(Byung-Suk Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목강학과 교수

<관심분야>

지반공학, 지구물리탐사