

고정익 무인항공기(드론)를 이용한 노천광산 지형측량 기술의 현장실증 이성재, 최요순*

On-site Demonstration of Topographic Surveying Techniques at Open-pit Mines using a Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle (Drone)

Sungjae Lee, Yosoon Choi*

Abstract This study performed an on-site demonstration of the topographic surveying technique at a large-scale open-pit limestone mine in Korea using a fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV, Drone, SenseFly eBee). 288 sheets of aerial photos were taken by an automatic flight for 30 minutes under conditions of 300 m altitude and 12 m/s speed. Except for 37 aerial photos in which no keypoint was detected, 251 aerial photos were utilized for data processing including correction and matching, then an orthomosaic image and digital surface model with 7 cm grid spacing could be generated. A comparison of the X, Y, Z-coordinates of 4 ground control points measured by differential global positioning system and those determined by fixed-wing UAV photogrammetry revealed that the root mean squared errors were around 15 cm. Because the fixed-wing UAV has relatively longer flight time and larger coverage area than rotary-wing UAVs, it can be effectively utilized in large-scale open-pit mines as a topographic surveying tool.

Key words Drone, Unmanned aerial vehicle, Photogrammetry, Digital surface model, Orthomosaic image

초 록 본 연구에서는 고정익 무인항공기(드론, SenseFly eBee)를 이용하여 국내 대규모 석회석 노천광산에 대한 지형측량을 수행하였다. 비행고도 300 m, 비행속도 12 m/s 조건으로 약 30분간 자동모드 비행을 수행한 결과 현장에서 총 288장의 항공사진을 촬영할 수 있었다. 특이점 추출이 불가능한 37장의 항공사진을 제외한 251장의 항공사진 자료들을 보정하고, 정합한 결과 7 cm 해상도의 정사영상과 수치표면모델 자료를 생성할 수 있었다. 4곳의 지상기준점에 대하여 고정밀 위성측정시스템을 이용하여 측정한 위치 좌표와 고정익 무인항공기 사진측량시스템을 이용하여 추출한 위치 좌표를 비교한 결과 평균 제공근 오차가 15 cm 내외로 분석되었다. 고정익 무인항공기는 회전익 무인항공기에 비해 상대적으로 비행시간이 길어 넓은 영역의 신속한 지형측량이 가능하므로 대규모 노천광산 현장에서 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

핵심어 드론, 무인항공기, 사진측량, 수치표면모델, 정사영상

1. 서 론

노천광산의 지형측량 작업에 사용되는 기법은 크게 인공위성이나 유인항공기의 촬영영상을 이용한 항공측

량 기법과 광파기, 위성측정시스템(global positioning system, GPS), 지상 레이저스캐너(terrestrial laser scanner) 등의 장비를 이용한 지상측량 기법으로 분류할 수 있다. 항공측량 기법은 노천광산 전역을 빠르게 측량할 수 있는 장점이 있으나, 측량 성과물의 오차가 상대적으로 크고 날씨의 영향을 받는다는 단점이 있다. 반면, 지상 측량 기법은 측량 성과물의 오차가 상대적으로 작다는 장점이 있으나 넓은 영역을 대상으로 작업을 수행하기에는 시간이 오래 걸리고 비용이 비싸다는 단점이 있다.

기존 지형측량 기법들의 장점과 단점을 상호 보완하기 위해 최근에는 무인항공기(unmanned aerial vehicle,

Received: Dec. 7, 2015

Revised: Dec. 16, 2015

Accepted: Dec. 16, 2015

***Corresponding Author:** Yosoon Choi

Tel) +82516296562, Fax) +82516296553

E-Mail) energy@pknu.ac.kr

Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

UAV)를 이용한 사진측량시스템을 노천광산 현장의 지형측량 작업에 적용하는 방안이 국내외에서 활발하게 연구되고 있다. 무인항공기 사진측량시스템은 기존의 항공측량 기법들에 비해 비교적 측정오차가 작고, 지상측량 기법들과 비교할 때 상대적으로 작업 가능 영역의 크기가 크다는 특징이 있기 때문이다. 해외에서는 Crydeman 등(2014)이 무인항공기를 이용하여 노천광산의 광석적치장 부피측량 작업을 수행하였으며, 그 결과를 GPS를 이용한 지상측량 결과와 비교하였을 때 0.2% 이내의 측정 오차를 보였다. Wang 등(2014)은 노천광산의 지형측량을 위해 Structure from Motion(SfM) 기법과 Patch-based Multiview Stereo(PVMS) 기법을 이용하여 무인항공기로 촬영한 항공사진을 처리하였으며, 측량 성과물은 40 cm 이내의 오차를 나타냈다. 국내에서는 Cho 등(2015)이 회전익 무인항공기를 이용하여 비금속 노천광산의 지형측량을 수행하였으며, 지형측량을 통해 제작한 수치표면모델(digital surface model, DSM)을 지질구조 해석에 활용하였다. Lee와 Choi(2015)는 보급형 회전익 무인항공기인 팬텀2 비전 플러스를 이용하여 소규모 석회석 노천광산의 지형측량을 수행하였으며, 측량성과물의 측정오차는 10 cm 이내로 나타났다.

국내에서 회전익 무인항공기를 이용하여 소규모 노천광산의 지형측량을 수행한 연구가 일부 수행되었으나, 고정익 무인항공기를 이용하여 대규모 노천광산의 지형측량을 수행한 사례는 현재까지 보고되지 않았다. 회전익 무인항공기는 수직이착륙이 가능하기 때문에 이착륙장의 확보가 어려운 소규모 노천광산에서 활용하기 용이하지만, 에너지 효율이 낮아 비행시간이 짧기 때문에 대규모 노천광산에서 활용하기 어려운 단점이 있다. 고정익 무인항공기는 공기의 양력으로 비행하기 때문에 상대적으로 에너지 효율이 높아 장시간의 비행이 가능하다. 따라서 이착륙장의 확보가 가능한 대규모 노천광산에서는 고정익 무인항공기를 활용하여 지형측량을 수행하는 것이 상대적으로 유리할 수 있으며, 이에 관한 현장실증 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 고정익 무인항공기를 이용한 노천광산 지형측량 기술을 강원도 삼척시에 위치한 쌍용자원개발(주) 신기사업소 석회석 노천광산을 대상으로 현장실증하는 것이다. 고정익 무인항공기 중 하나인 스위스 SenseFly의 eBee를 이용하여 연구지역의 항공사진 촬영을 수행하고, 촬영된 영상들을 이용하여 정사영상(orthomosaic image)과 수치표면모델을 제작하였다. 4개의 지상기준점(ground control point, GCP)들에 대해 고정밀 GPS를 이용하여 측정한 좌표값들과의 비교를 통해 고정익 무인항공기를 이용한 측량 성과물의 정확

도를 평가하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

강원도 삼척시에 위치한 쌍용자원개발(주) 신기사업소에서는 시멘트용 저품위 석회석을 두 곳의 채광장(5지구, 6지구)에서 노천채광 방식으로 생산하고 있다. 본 연구에서는 고정익 무인항공기 지형측량 기술의 현장실증을 위해 신기사업소의 6지구 채광장을 연구지역으로 선정하였다. 연구지역의 크기는 약 1,000 m × 1,300 m이며, 해발고도는 240 m-350 m이다. Fig. 1은 구글어스에서 제공하는 연구지역의 위성사진을 보여준다.

2.2 지상기준점 설치 및 좌표 측정

무인항공기를 이용한 지형측량 성과물의 정확도를 개선하기 위해서는 지상기준점을 이용한 자료의 보정작업이 필요하다. 본 연구에서는 1 m × 1 m 크기의 대공표식지를 이용하여 연구지역 내에 4곳의 지상기준점들을 설치하였다(Fig. 1). 연구지역 좌측하단 영역은 연구수행 당시 현장접근이 어려웠기 때문에 지상기준점을 설치할 수 없었다.

지상기준점들의 좌표 측정을 위해 고정밀 GPS 장비인 Novatel의 SMART-V1을 이용하였다. 대공표식지의 중심점에 고정밀 GPS를 수직으로 위치시킨 후 약 1분간 위성신호를 수신하여 각 지상기준점들의 X, Y, Z 좌표를 측정하였다. WGS84 타원체와 Universal Transverse Mercator(UTM, 52N) 좌표계를 기준으로 측정된 지상기준점들의 좌표를 표시한 결과는 Table 1과 같다.

2.3 고정익 무인항공기를 이용한 항공사진 촬영

본 연구에서 사용한 고정익 무인항공기 장비는 스위스 SenseFly의 eBee이다(Fig. 2(a)). eBee는 글라이더 형태이며 자이로스코프(Gyroscope), GPS/INS 등의 센서가 내장되어 있어 비행 시 위치정보, 자세제어 정보 등을 기록할 수 있는 기능이 있다. 기체의 무게는 약 0.69 kg 정도이며, 이동속도는 최고 12 m/s이다. 배터리 완충 시 비행시간은 40분 정도이다.

항공사진 촬영을 위해 1200만 화소의 캐논 S110 RGB 카메라를 eBee에 탑재하였다. 탑재한 카메라는 비측량용 카메라이기 때문에 촬영된 항공사진을 보정하기 위해서는 내부표정요소에 관한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 캐논 S110 RGB 카메라로 5 × 6 격자 측정용지(Fig. 2(b))를 상하좌우 방향에서 촬영하여 왜곡정도, 초점거리 등 내부표정요소 인자의 값들을 검정하였다

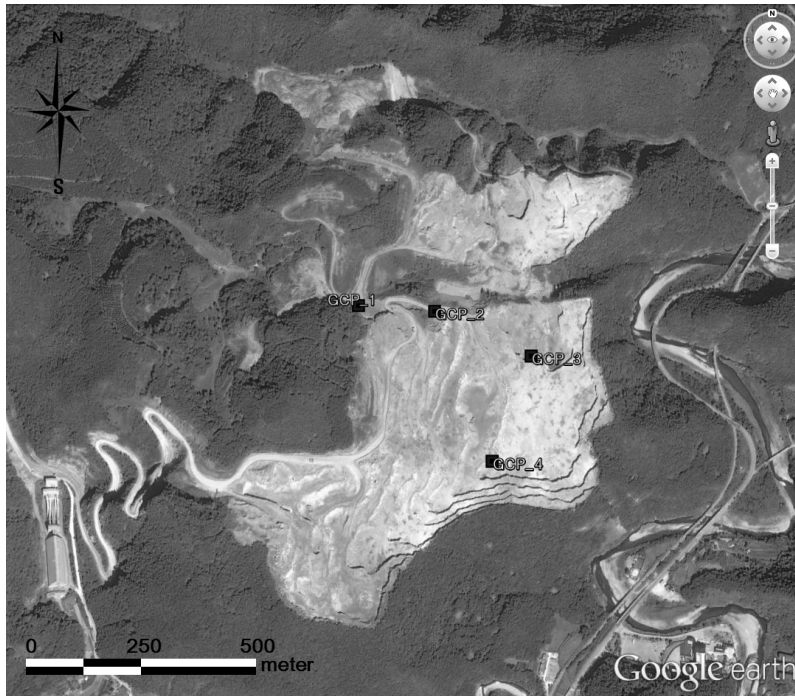


Fig. 1. Aerial view of the study area and locations of ground control points (image source: Google Earth, <http://www.google.com/earth/index.html>)

Table 1. Coordinates of the ground control points(GCPs) installed in the study area

GCPs	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	506743.32	4134756.91	265.2
2	506935.40	4134743.43	252.9
3	507163.53	4134632.34	223.8
4	507064.12	4134377.43	223.2

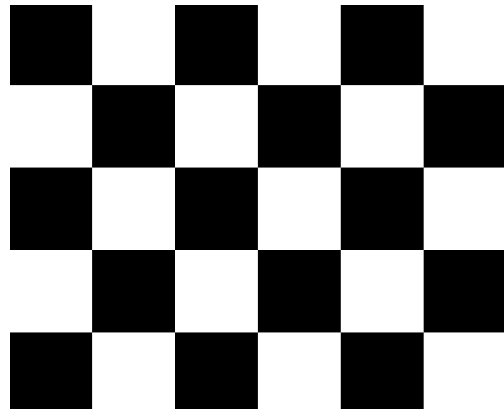
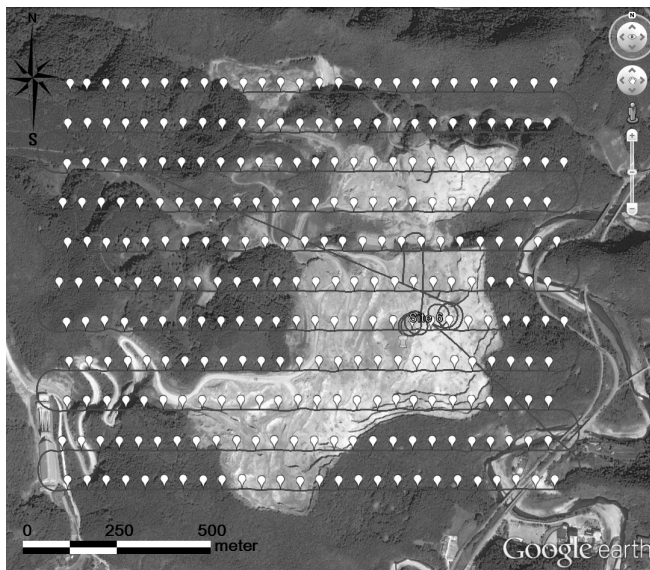


Fig. 2. Views of (a) the SenseFly's eBee and (b) a sheet used for camera calibration

Table 2. Inner orientation parameters of the camera mounted on eBee

Item (unit)	Factor	Calibration value
Focal length (mm)	f	5.29844
Sensor (mm)	Width	7.440
	Height	5.580
Principal point offset (mm)	X	3.80836
	Y	2.77957
Distortion factor	K1	-0.040
	K2	-0.012
	K3	0.007
	P1	0.000
	P2	0.004
Image size (pixels)	X	4,000
	Y	3,000

**Fig. 3.** Flight route and shooting points designed for the study area

(Table 2).

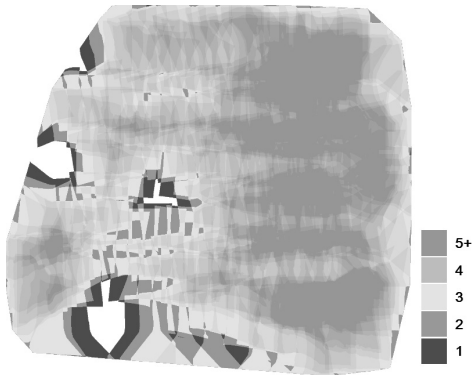
항공사진 촬영을 위한 비행계획은 eMotion2 소프트웨어를 이용하여 수립된다. eMotion2는 eBee의 제어를 위해 SenseFly에서 함께 제공하는 소프트웨어로서 이를 이용하여 eBee의 측정범위, 비행경로, 비행고도, 촬영 중첩도 등을 설정할 수 있다. 배터리 완충 시의 최대 비행시간을 고려하여 비행경로를 Fig. 3과 같이 설정하였으며, 비행고도는 주변 산지의 지형고도를 고려하여 300 m 이상으로 설정하였다. 또한, 촬영될 항공사진의 횡중첩도와 종중첩도는 각각 80%, 90%로 설정하였다.

2.4 데이터처리

현장에서 촬영된 항공사진의 자료처리를 위해 Postflight Terra 3D (ver 3.4)를 사용하였다(<https://www.sensefly.com/drones/postflight-terra-3d.html>). Postflight Terra 3D는 Lee와 Choi(2015)의 연구에서 사용된 Pix4D mapper pro(<http://pix4d.com>) 소프트웨어와 동일한 원리로 구동된다. 무인항공기로부터 촬영된 항공사진들이 Postflight Terra 3D에 입력되면 다수의 영상들로부터 동시에 식별이 가능한 특이점(key point)들이 자동으로 추출된다. 추출된 특이점들은 지상기준점들의 좌표 정보를 반영

Table 3. Results of flight and data processing

Site	Pit 6
Average resolution	7.03 cm
Coverage area	194.45 ha
Num. of calibrated images	251 out of 288
Num. of 2D keypoints	45,003 per image
Num. of 3D cloud points	82,868,607
Average density	26.54 per m ³
Time for data processing	about 8 hours

**Fig. 4.** Number of overlapping images for each pixel

하여 자동항공삼각법(automatic aerial triangulation, AAT)에 의해 기하보정된다(Siebert and Teizer, 2014). 각각의 항공사진에서 특이점들의 기하보정이 완료되면, 연속하는 항공사진들 간의 비교를 통해 영상을 정합하여 정사영상을 제작할 수 있다. 또한, 정합된 영상으로부터 특이점들을 추출하면 3차원 좌표를 가지는 점군 데이터(3D cloud point)를 생성할 수 있으며, 이를 이용하면 수치표면모델의 제작이 가능하다. 데이터처리 방법에 대한 보다 자세한 설명은 Lee와 Choi(2015)를 참조하길 바란다.

3. 연구결과

연구지역의 약 194 ha 영역에 대하여 고정의 무인항공기를 이용하여 항공사진 촬영을 수행한 결과는 Table 3과 같다. 비행계획에 따라 총 288장의 항공사진이 촬영되었다. 촬영된 288장의 사진 중 37장은 산림 지역만 포함하고 있어 특이점 추출이 되지 않아, 특이점 추출이 가능한 251장의 항공사진들만 자료처리 시 사용하였다. 촬영된 항공사진들의 평균 공간해상도는 약 7 cm/pixel로 나타났다. Postflight Terra 3D를 이용하여 251장의

Table 4. Differences between the X, Y, Z-coordinates of the ground control points measured by differential GPS and those extracted by UAV photogrammetry

GCPs	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
1	0.272	0.038	-0.090
2	-0.082	0.008	0.170
3	0.101	-0.008	-0.170
4	0.049	-0.007	-0.140
RMSE	0.152	0.020	0.140

항공사진을 처리하는 데에는 약 8시간 정도가 소요되었다(Windows 7-64bit 운영체제, 2.93GHz × 4 CPU, 8G RAM, Nvidia Quadro 600 그래픽카드 기준). Fig. 4는 251장의 항공사진들을 정합한 결과 각 픽셀에 중첩된 항공사진의 수를 보여준다. 노천채광장 영역은 대부분 5장 이상의 항공사진들이 중첩된 것을 볼 수 있다. 중첩된 영상의 수가 3개 미만인 픽셀들은 대부분 항공사진에서 특이점 추출이 되지 않았던 산림 지역을 나타낸다.

Fig. 5에서는 고정의 무인항공기를 사용하여 제작한 지형측량 성과품들을 보여준다. 현장실증 결과 연구지역에 대한 7 cm/pixel 해상도의 수치표면모델(Fig. 5(a))과 정사영상(Fig. 5(b))을 제작할 수 있었다. 또한, 수치표면모델 자료로부터 10 m 간격의 지형등고선을 추출할 수 있었다(Fig. 5(c)). Fig. 5(d)는 연구지역의 지형측량 결과를 3차원으로 도시한 것이다.

연구지역에 설정한 4개 지상기준점들에 대하여 고정밀 GPS를 사용하여 지상에서 좌표를 측정한 결과(Table 1)와 고정의 무인항공기로부터 제작된 결과물들을 WGS84 타원체와 Universal Transverse Mercator(UTM, 52N) 좌표계를 기준으로 투영하여 추출한 좌표를 비교한 결과는 Table 4와 같다. 4개 지상기준점들의 위치좌표에 대한 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)는 X 방향에서 15 cm, Y 방향에서 2 cm, Z 방향에서 14 cm 정도로 나타났다. 즉, 고정밀 GPS를 이용한 지상측량 결과와 비교할 때 상대적으로 약 15cm 내외의 오차를 가지는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 고정의 무인항공기 중 하나인 스위스 SenseFly의 eBee를 이용하여 쌍용자원개발(주) 신기사업소 6지구 작업장을 대상으로 노천광산 지형측량 기술의 현장실증을 수행하였다. 약 194 ha 크기의 연구지역에 대하여 지형측량을 수행하는 데 소요된 작업시간은

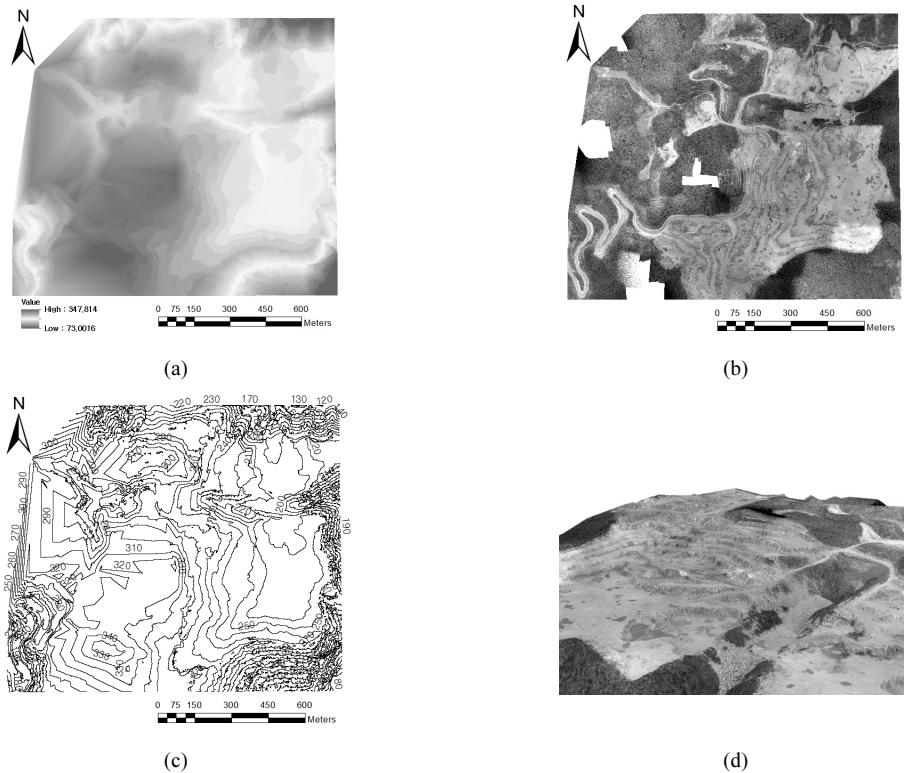


Fig. 5. Results of topographic surveying. (a) Digital surface model. (b) Orthomosaic image. (c) Topographic contours (interval: 10 m). (d) 3D visualization of the study area using the orthomosaic image and digital surface model

지상기준점 설치 및 고정밀 GPS를 이용한 좌표 측정에 약 1시간, 고정의 무인항공기를 이용한 항공사진 촬영에 약 30분, 데이터처리에 약 8시간이 소요되었다. 기존에 해당 연구지역에서 연간 1회 정도 실시되었던 광과기를 이용한 지상측량 작업에 1주일 이상의 작업시간이 소요된 것과 비교할 때, 고정의 무인항공기를 이용한 지형측량은 작업시간 측면에서 매우 효율적임을 증명할 수 있었다.

연구지역에서 고정의 무인항공기를 이용하여 촬영한 251장의 항공사진들을 Postflight Terra 3D 소프트웨어로 자료처리한 결과 7 cm/pixel 해상도의 수치표면모델과 정사영상을 제작할 수 있었다. 측량성과물의 정확도 평가를 위해 연구지역에 설정한 4개 지상기준점에 대하여 지상에서 고정밀 GPS를 이용하여 측정한 좌표값들과 무인항공기를 이용하여 측정한 좌표값들을 비교한 결과 지상측량 결과와 비교할 때 상대적으로 15 cm 내외의 오차를 가지는 것으로 분석되었다. 이 결과는 ASPRS (1988)에서 지형도 작성을 위해 제시한 수평방향 최대

오차 30 cm(1:1200, map scale 기준)와 수직방향 최대 오차 25 cm(1:1000, map scale 기준) 수준을 만족하며, 무인항공기를 이용하여 지형측량을 수행했던 최근의 연구들(Turner et al., 2012, Jung et al., 2009, Cryderman et al., 2014, Uysal et al., 2015, Cho et al., 2015, Lee and Choi, 2015)과도 유사한 오차수준을 나타낸다. 노천광산에서 이루어지는 채광작업 특성을 고려할 때 15 cm 내외의 오차수준을 가지는 측량 성과물은 지형도 작성을 위한 목적으로 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용한 고정의 무인항공기는 보급형 회전익 무인항공기에 비해 상대적으로 고가의 장비이지만, 넓은 지역을 신속하게 측량할 수 있기 때문에 대규모 노천광산 현장에서의 활용성이 높다. 또한, 1-2명 정도의 소수인력으로 운영이 가능하다는 장점이 있다. 향후에는 고정익 또는 회전익 무인항공기를 이용하여 획득한 노천광산의 측량 성과물들을 비교하는 연구와 실제 채광장의 생산성 및 안전성 향상을 위해 이를 효과

적으로 활용할 수 있는 방법에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 이공학 개인기초연구지원사업(2015R1D1A1A01061290)의 지원을 받아 수행되었다. 또한, 일부저자는 산업통상자원부 2단계 자원개발특성화대학사업 산학협력연구단(연구과제: 광물자원 탐사·개발)의 지원을 받았다.

References

1. ASPRS, 1989, ASPRS INTERIM ACCURACY STANDARDS FOR LARGE-SCALE MAPS, American Society of Photogrammetric and Remote Sensing, Vol. 55, pp. 1038-1940.
2. Cho, S.J., Bang, E.S., Kang, I.M., 2015, Construction of Precise Digital Terrain Model for Nonmetal Open-pit Mine by Using Unmanned Aerial Photograph, Economic and Environmental Geology, Vol. 48, No. 3, 205-212.
3. Cryderman, C., Bill Mah, S. and Shuflertski, A., 2014, Evaluation of UAV Photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations, GEOMATICA, Vol. 68, No. 4, 309-317.
4. Jung, S.H., Lim, H.M., Lee, J.K., 2009, Analysis of the Accuracy of the UAV Photogrammetric Method using Digital Camera, J. of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 27, No. 6, 741-747.
5. Lee, S., Choi, Y., 2015, Topographic survey at small-scale Open-pit Mines using a Popular Rotary-wing Unmanned Aerial Vehicle(Drone), TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 25, No. 5, 462-469.
6. Siebert, S. and Teizer, J., 2014, Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle(UAV) system, Automation in Construction, Vol. 41, 1-14.
7. Turner, D., Lucieer, A. and Watson, C., 2012, An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery based on structure from motion (SfM) point clouds, Remote Sensing, Vol. 4, No. 5, 1392-1410.
8. Uysal, M., Toprak, A.S. and Polat, N., 2015, DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill, Measurement, Vol. 73, 539-543.
9. Wang, Q., Wu, L., Chen, S., Shu, D., Xu, Z., Li, F. and Wang, R., 2014, Accuracy Evaluation of 3D Geometry from Low-Attitude UAV Images:A Case Study at Zijin Mine, Proc. of 4th International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, Suzhou, China, May 14-16, 297-300.



이 성 재

2014년 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 공학사

Tel: 051-629-6550
E-mail: lsjtjtwo@gmail.com
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 석사과정



최 요 순

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2009년 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 공학박사
2010년 미국 펜실베이니아 주립 대학교 에너지자원공학과 Post-Doc

Tel: 051-629-6562
E-mail: energy@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 부교수