

드론영상 기반 고밀 도심지의 3차원 공간모형의 정밀도에 관한 연구

A Study on Precision of 3D Spatial Model of a Highly Dense Urban Area based on Drone Images

최연우¹⁾ · 윤혜원²⁾ · 추미진³⁾ · 윤동근⁴⁾

Choi, Yeon Woo · Yoon, Hye Won · Choo, Mi Jin · Yoon, Dong Keun

Abstract

The 3D spatial model is an analysis framework for solving urban problems and is used in various fields such as urban planning, environment, land and housing management, and disaster simulation. The utilization of drones that can capture 3D images in a short time at a low cost is increasing for the construction of 3D spatial model. In terms of building a virtual city and utilizing simulation modules, high location accuracy of aerial survey and precision of 3D spatial model function as important factors, so a method to increase the accuracy has been proposed. This study analyzed location accuracy of aerial survey and precision of 3D spatial model by each condition of aerial survey for urban areas where buildings are densely located. We selected Daerim 2-dong, Yeongdeungpo-gu, Seoul as a target area and applied shooting angle, shooting altitude, and overlap rate as conditions for the aerial survey. In this study, we calculated the location accuracy of aerial survey by analyzing the difference between an actual survey value of CPs and a predicted value of 3D spatial Model. Also, We calculated the precision of 3D spatial Model by analyzing the difference between the position of Point cloud and the 3D spatial Model (3D Mesh). As a result of this study, the location accuracy tended to be high at a relatively high rate of overlap, but the higher the rate of overlap, the lower the precision of 3D spatial model and the higher the shooting angle, the higher precision. Also, there was no significant relationship with precision. In terms of baseline-height ratio, the precision tended to be improved as the baseline-height ratio increased.

Keywords : Drone, 3D spatial model, Precision, Angle, Altitude, Overlap, Baseline-height ratio

초 록

3차원 공간모형은 도시문제 해결을 위한 분석틀로서 도시계획, 환경, 토지 및 주택관리, 재난 시뮬레이션 등 다양한 분야에서 이용되고 있다. 또한, 3차원 공간모형의 구축 시에 저비용으로 단시간에 3차원 영상 촬영이 가능한 드론의 활용성은 증가하고 있다. 드론을 활용한 가상도시 구축 및 시뮬레이션 모듈 활용 측면에서 항공촬영의 정확도 및 3차원 공간모형의 정밀도는 매우 중요한 요소로 기능하기 때문에 이를 향상시키기 위한 방법들이 제안되고 있다. 본 연구는 건축물이 밀집하여 위치한 도심지를 대상으로 항공촬영 조건별로 드론을 활용한 항공촬영의 정확도 및 3차원 공간모형의 정밀도를 비교분석하였다. 분석 대상지는 서울특별시 영등포구 대림2동 내 건축물 밀집도가 높은 일부지역으로 선정하였으며 항공촬영 조건으로, 촬영각, 촬영고도, 드론영상의 중복률을 활용하였다. 항공촬영의 정확도는 대상지 내에 설치한 검사점의 실제 측량값과 항공촬영을 통해 구축한 3차원 공간모형의 예측값 간의 차이를 분석함으로써 정확도를 산정하였다. 3차원 공간모형의 정밀도는 항공촬영을 통해 생산된 Point cloud와 Point cloud에 기반하여 구축된 3차원 공간모형 간의 차이를 분석함으로써 정밀도를 산정하였다. 분석결과, 정확도의 경우, 상대적으로 높은 중복률에서 정확도가 높은 것으로 분석되었으나, 정밀도의 경우에는 중복률이 높을수록 정밀도는 오히려 낮아지는 경향을 보였으며 촬영각도가 수직에 가까울수록 정밀도는 높아지는 경향을 보였다. 촬영고도의 경우에는 정밀도와 유의미한 관련성은 없는 것으로 분석되었고, 기선고도비의 경우에는 중복률과 상이하게, 기선고도비가 커질수록 정밀도는 높아지는 경향을 보였다.

핵심어 : 드론, 3차원 공간모형, 정밀도, 각도, 고도, 중복률, 기선고도비

Received 2022. 01. 28, Revised 2022. 02. 10, Accepted 2022. 04. 19

1) Member, Dept. of Urban Planning and Engineering, Yonsei University (E-mail: tjrrms3@yonsei.ac.kr)

2) Dept. of Urban Planning and Engineering, Yonsei University (E-mail: rw7270rw@yonsei.ac.kr)

3) Dept. of Urban Planning and Engineering, Yonsei University (E-mail: alws2599@yonsei.ac.kr)

4) Corresponding Author, Member, Dept. of Urban Planning and Engineering (E-mail: dkyoon@yonsei.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

GIS (Geographic Information System) 기반 3차원 공간모형은 국토 및 지역에서 발생하는 다양한 도시문제의 해결을 위한 분석도구로서 활용되고 있다. 3차원 공간모형은 기존의 2차원 공간정보가 3차원으로 확장된 형태로서, 디지털트윈(Digital Twin) 구축의 핵심적인 요소로 활용되고 있다. 디지털트윈은 현실과 유사한 3차원 도시 모델을 생성하는 시스템으로, 도시계획, 시설물관리, 교통사고 예방, 시설물관리 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 서울특별시의 경우, 서울 전역을 대상으로 한 디지털트윈 구축사업을 통해 '디지털트윈 서울 S-Map'을 구축하여, 각종 도시문제 해결을 위하여 활용하고 있다. 인천광역시에서도 인천광역시 전역을 대상으로 GIS플랫폼 기반의 디지털트윈을 구축하여 도시환경 변화에 따른 문제의 사전예방, 시민안전 관리 등의 분야에 활용하고 있다. 최근에 들어서는, 드론 등 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)를 통해 촬영된 드론영상에 도시의 3차원 공간모형 구축 시 활발하게 활용되고 있다. 드론을 활용한 항공측량은 광범위한 지역을 빠르게 측량하여 대용량의 공간정보를 생산할 수 있어, 그 활용성은 확대되고 있다. 항공기를 활용한 항공측량과 비교하면, 특정한 시점을 정하여 원하는 장소를 촬영함으로써 데이터의 시의성을 확보하기 수월하다는 점에서 공간정보 관련 분야에서의 적용분야는 더욱 넓어질 전망이다.

드론을 활용한 항공측량의 장점을 극대화하기 위해서는 항공측량 결과물의 정확도를 확보하는 것이 매우 중요하다. 드론을 활용한 항공측량은 국소 지역을 신속하게 측량하여 대용량의 공간정보를 쉽게 생산할 수 있다는 장점이 있지만, 결과물의 정확도가 확보되지 않다면 그 가치를 상실할 수 있다. 특히, 항공측량을 통해 3차원 공간모형을 구축할 때, 모형 내의 각각의 3차원 건축물별 촬영된 데이터의 정밀도와 정확도를 확보하는 것이 중요함에도 불구하고 이를 향상시킬 수 있는 합리적인 항공촬영방법 및 촬영조건은 제시되지 못하고 있다. 또한, 다양한 형태 및 높이를 지니는 건축물들이 밀집되어 있는 도심지에서는 항공측량의 정확도 및 정밀도를 확보하는 것이 매우 어려움에도 불구하고, 이에 관하여 수립된 구체적인 지침 또는 기준이 부재한 상황이다.

위의 한계를 보완하기 위하여, 기존 선행연구에서는 항공측량 결과물의 정확도를 높일 수 있는 다양한 촬영조건을 분석하여 제시한 바 있다. 대부분의 선행연구에서는 항공측량을 통해 생산된 정사영상을 기준으로 관측지점의 실제 위경도와 항공촬영으로 측정된 위경도 값 간의 차이를 비교분석함으로써 항공측량 결과물의 정확도를 분석하였다. Lee and Lee(2017)의

연구에서는 항공촬영 시, 촬영고도 및 카메라의 촬영각에 따라 항공측량의 정확도가 달라질 수 있으며 정사영상을 제작할 때에는 수직으로 촬영하는 것이, 3차원 공간모형을 제작할 때에는 각도로 촬영하는 것이 적합함을 분석한 바 있다. Yoo *et al.*(2016)의 연구에서는 항공촬영을 통한 정사영상 및 DSM(Digital Surface Model)의 정확도에 영향을 미치는 요인으로서 드론영상의 중복률 및 지상기준점이 중요함을 제시하였으며, 높은 중복률을 통해 촘촘한 사진을 촬영하고 다수의 지상기준점을 통해 위치좌표를 보정할수록 측량결과물의 정확도가 높아짐을 제시한 바 있다. Cho *et al.*(2020)의 연구에서도 정사영상 및 3차원 공간모형 구축에 적합한 드론의 항공촬영 조건을 분석한 바 있으며 촬영고도는 50~100m, 중복률은 70% 이상, 촬영경사는 80°이상일 때 가장 정확한 결과물을 생산할 수 있음을 분석하였다. Yun and Yoon(2018)과 Kim and Hong(2020)의 연구에서는 항공측량 결과물의 정확도를 향상시키기 위한 방안으로서 항공촬영 조건도 중요하지만 지상에 설치하는 지상기준점(GCP: Ground Control Point)의 배치가 더욱 중요함을 분석하였다. 해당 연구에서는 동일한 항공촬영 조건일 때, 대상지 내에 지상기준점이 고르게 배치될수록 항공측량 결과물의 정확도가 높아질 수 있고 지상기준점 간의 이격거리가 클 경우 정확도가 떨어질 수 있음을 분석하였다. 이와 유사하게, Kim *et al.*(2018)의 연구에서는 정사영상의 정확도에 영향을 미치는 요인으로 촬영고도와 지상기준점을 제시하였으며, 실험을 통해 높은 촬영고도에서는 정확도가 낮아지는 경향이 있고 지상기준점이 대상지 외곽선을 따라 3~4개만 설치해도 정확도를 확보할 수 있음을 분석하였다. Son *et al.*(2018)의 연구에서는 항공촬영의 중복률 및 촬영고도와 지상기준점 개수에 따른 3차원 공간모형의 위치 정확도 변화를 비교분석하였으며, 분석을 통해 150m의 촬영고도에서 중중복률 60~70%, 횡중복률 30~40%로 설정하였을 때 가장 정확한 결과를 도출할 수 있으며, GCP는 최소 10개가 설치되어야 함을 분석하였다.

선행연구 검토를 통하여 항공촬영을 통한 측량 결과물의 정확도를 높이기 위한 방안을 분석한 선행연구들이 다수 수행된 것을 알 수 있다. 그러나 대부분의 선행연구들에서는 건축물 밀도가 낮은 공터나 농지, 대학 캠퍼스 등을 중심으로 연구가 수행되었고, 실제 건축물 밀도가 높은 도심지에 관한 연구는 수행되지 못하였다. 대상지의 특징에 따라 적합한 항공촬영 조건이 상이해질 수 있음을 고려한다면 선행연구에서 분석한 적합한 항공촬영 조건이 도심지에서는 적용되지 못할 가능성이 높다. 이러한 배경에서 본 연구는 국내 도심지 중에서도 건축물 밀도가 상대적으로 높은 서울특별시 내의 도심지를 대상으로 항공측량 결과물의 정확도 및 3차원 공간모형의 정밀도를 높일 수 있는 항공촬영 조건을 실증적으로 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 촬영조건별 항공촬영

고밀 도심지 내에서의 적합한 항공촬영 조건을 분석하기 위하여 촬영고도 조건은 80m, 100m, 120m로, 촬영각 조건은 45°, 60°, 75°, 90°로, 중복률 조건은 40%, 60%, 80%로 세분화하고 이를 조합하여 총 36번의 항공촬영을 실시하였다(Table 1). 촬영고도는 드론영상을 촬영하는 지점의 높이를 의미하며, 대상지 내의 건축물의 높이를 고려하여 최저고도를 80m로 설정하였으며, 그 다음으로는 20m씩 높여 100m, 120m로 구분하였다. 촬영각은 드론에 내장된 카메라가 대상지를 촬영하는 각도를 의미하며, 본 연구에서 활용한 Phantom4 RTK는 -90°에서 -30°내에서 촬영각을 조정할 수 있다. 본 연구에서는 수직각 촬영과 고경사각 촬영, 일반각 촬영을 구분하기 위하여 수직각은 -90°, 고경사각은 -75° 및 -60°, 일반각은 -45°로 구분하였다. 마지막으로 중복률은 촬영되는 드론영상 간의 겹쳐지는 수준을 의미한다. 중복률이 높을수록 드론영상들 간의 겹쳐지는 부분이 증가하여 보다 촘촘하게 사진이 촬영되고, 반대로 중복률이 낮을수록 드론영상들 간의 겹쳐지는 부분이 감소하여 상대적으로 덜 촘촘하게 사진이 촬영된다. 본 연구에서는 Phantom4 RTK에서 3차원 측량 시에 권장하는 중복률(80%)과 60%, 40%로 촬영 중복률을 구분하였으며, 횡중복률과 종중복률은 동일한 값으로 적용하였다.

Table 1. Shooting conditions of aerial survey

No	Overlap (%)	Camera Angle(°)	Altitude (m)	No	Overlap (%)	Camera Angle(°)	Altitude (m)
1	80	90	120	19	60	60	100
2	80	75	120	20	60	45	100
3	80	60	120	21	60	90	80
4	80	45	120	22	60	75	80
5	80	90	100	23	60	60	80
6	80	75	100	24	60	45	80
7	80	60	100	25	40	90	120
8	80	45	100	26	40	75	120
9	80	90	80	27	40	60	120
10	80	75	80	28	40	45	120
11	80	60	80	29	40	90	100
12	80	45	80	30	40	75	100
13	60	90	120	31	40	60	100
14	60	75	120	32	40	45	100
15	60	60	120	33	40	90	80
16	60	45	120	34	40	75	80
17	60	90	100	35	40	60	80
18	60	75	100	36	40	45	80

2.2 항공촬영의 정확도 분석

항공촬영의 정확도를 비교분석하기 위하여, 드론영상으로부터 생성한 Point cloud를 활용하여 ArcGIS Pro에서 수치표면모델(DSM: Digital Surface Model)을 구축하였다. 이후, 수치표면모델상에서의 x, y, z 값과 검사점(CP: Check Point)과의 차이(RMSE: Root Mean Square Error)를 비교 분석함으로써 3차원 공간모형의 정확도를 분석하였다.

정확도 분석 시, 수치표면모델은 드론으로 촬영한 영상에서 추출된 Point cloud의 위경도 및 고도 값으로 구축되었기 때문에 예측값에 해당하고, 검사점은 대상지 내의 검사점 위치를 기준으로 GNSS GPS 측정계를 이용하여 측량한 실측값에 해당한다고 할 수 있다. 본 연구는 위의 예측값과 실측값 간의 차이(RMSE)를 비교분석함으로써 항공촬영 정확도를 분석하였다.

2.3 촬영조건별 3차원 공간모형의 정밀도 비교분석

본 연구에서는 다음과 같은 절차로 항공촬영 조건별 3차원 공간모형의 정밀도를 비교분석하였다. 먼저, 정확도 비교분석에서와 같이 Pix4D Mapper를 활용하여 드론으로 촬영한 드론영상으로부터 대상지의 Point cloud를 생성하였다. ArcGIS Pro에서 Point cloud를 활용하여 수치표면모델과 수치지형모델(DTM: Digital Terrain Model)을 구축하고 두 모델의 차분으로 건축물 표면모델인 nDSM을 구축하였으며, 이때 모든 모델의 해상도는 0.3M로 재생산하였다. 이후, 3차원 건축물을 구축하기 위하여, 최종적으로 구축된 건축물 표면모델(nDSM)과 건축물대장 및 표제부에서 구득한 건축물 평면도(Building Footprint)를 활용하여 ArcGIS Pro의 3D Basemap Module에 기반한 3차원 건축물을 구축하였다(Fig. 1).

정밀도 분석 시, 위의 과정을 통해 구축한 3차원 건축물 모형과 이를 구축하는데 활용한 Point cloud 간의 x, y, z 값의 차이를 분석하여 정밀도를 산정하는데 차이(RMSE)가 적을수록 활용된 Point cloud와 3차원 건축물 간의 오차가 적어 Point cloud의 분포와 유사하게 정밀한 3차원 건축물이 구축된 것을 의미한다고 할 수 있다. 반대로, 차이가 클수록 상대적으로 구축된 3차원 건축물의 정밀도는 낮은 것으로 해석할 수 있다. 본 연구는 위와 같은 방식으로 항공촬영 조건별로 3차원 공간모형의 정밀도를 비교분석하였다. 또한, 항공촬영 조건 중에서 중복률과 촬영고도를 복합적으로 고려하기 위해 기선고도비(Baseline-Height Ratio)를 산정하여 해당 조건의 변화에 따른 정밀도의 변화를 추가적으로 분석하였으며, 본 연구에서 활용한 기선고도비의 산식은 다음과 같다(Eq. (1)). 기선고도비는 항공사진 촬영에 활용된 카메라의 초점거

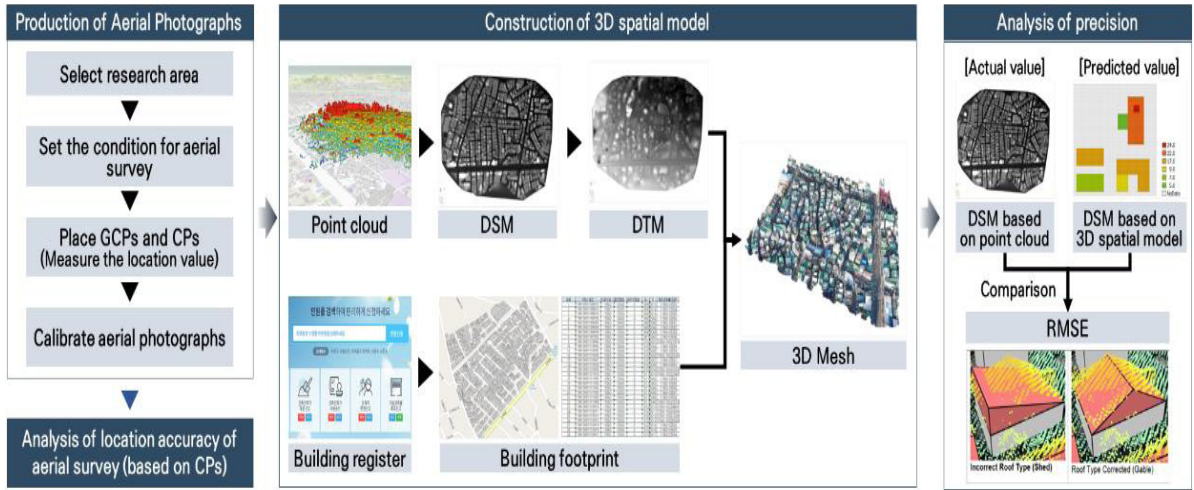


Fig. 1. Flowchart of analyzing precision of 3D spatial model

리, 항공사진의 크기, 항공사진의 중복률에 의해 산정되는데, 산정식에서 f 는 초점거리를 의미하고 m 은 항공사진의 크기를, e 는 항공사진의 중중복률을 의미한다(Eq. (1)).

$$\text{Baseline Height Ratio} = (1/f) \times m \times (1 - e/100) \quad (1)$$

3. 연구결과

3.1 연구대상지 및 항공촬영

본 연구는 서울특별시 영등포구 대림2동 중, 건축물이 밀집되어 위치한 일부지역을 대상으로 선정하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 지역의 총 면적은 약 26,832.3m²이며, 145개의 건축물이 밀집되어 위치해 있다(Fig. 2).

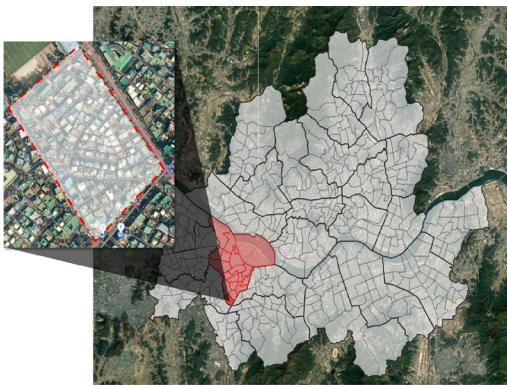


Fig. 2. Study area of research

본 연구는 항공촬영을 위하여 DJI사의 Phantom4 RTK 장비를 사용하였고 카메라는 해당 드론의 내장카메라를 활용하였으며, 드론영상의 위경도 및 고도정보의 정확도를 보정하기 위하여 D-RTK 2 High Precision GNSS Mobile Station을 활용하였다. 해당 장비의 경우, 국내 항공측량 관련 연구에서 일반적으로 활용되고 있는 장비로서(Oh *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2020) 본 연구에서도 해당 장비를 활용하여 대상지의 항공촬영을 수행하였으며, 항공촬영 시 촬영모드(트리거)는 시간초과촬영 방식을 적용하였다. 항공촬영 경로는 DJI Phantom4 RTK 전용 컨트롤러의 3D 격자측량 방법을 활용하여 설정하였으며, 대상지 내에 설치된 지상기준점 및 검사점이 포함될 수 있도록 항공촬영 경로를 설정하였다(Fig. 3).

항공촬영 시, 대상지 내에 지상기준점 및 검사점을 설치하였으며, 무인비행장치 이용 공공측량 작업지침에 따라 작업지역의 형태 및 작업 범위를 고려하여 각 점들을 배치하였다(Fig. 3). 지상기준점의 경우, 대상지의 외곽을 기준으로 4점, 검사점은 대상지 내부를 포함하여 3점을 선정하여 배치하였다. 지상기준점 및 검사점의 위경도 및 고도값은 Leica GS18 T GNSS RTK 장비를 활용한 GNSS 네트워크-RTK 기법으로 측량 위도 및 경도를 결정하여 실측하였다. 또한, Pix4D Mapper 분석상의 오류를 최소화하기 위하여 실측된 위경도 및 고도값을 WGS 84 UTM Zone 52N 좌표계를 적용하여 변환 후 활용하였다(Table 2).

Table 2. Location of GCP and CP

GCP and CP		NX(m)	EY(m)	Elev(m)
GCP	1	314358.31	4151579.60	39.16
	2	314453.14	4151660.80	41.85
	3	314463.09	4151386.14	40.40
	4	314555.37	4151480.63	38.77
CP	1	314416.19	4151473.97	40.24
	2	314442.38	4151510.45	40.51
	3	314492.18	4151601.95	40.47

Table 3. Accuracy of aerial survey using CP and GSD according to shooting condition

No	Shooting condition			RMSE(m)			GSD (cm/inch)	Mean reprojection error
	Overlap (%)	Angle (°)	Altitude (m)	N	E	Z		
1	80	90	120	0.89	1.18	1.38	2.55	0.242
2	80	75	120	1.02	1.50	0.85	2.53	0.222
3	80	60	120	1.23	1.49	0.90	2.54	0.214
4	80	45	120	1.04	1.28	0.99	2.54	0.215
5	80	90	100	0.87	1.18	1.23	2.53	0.255
6	80	75	100	1.03	1.50	0.92	2.55	0.238
7	80	60	100	1.07	1.54	1.19	2.54	0.228
8	80	45	100	0.89	1.40	0.96	2.54	0.22
9	80	90	80	0.84	1.16	1.28	2.55	0.276
10	80	75	80	0.90	1.20	1.07	2.55	0.292
11	80	60	80	0.92	1.23	1.01	2.54	0.23
12	80	45	80	1.01	1.21	0.96	2.54	0.214
13	60	90	120	0.91	1.29	1.15	2.53	0.216
14	60	75	120	0.90	1.31	0.97	2.55	0.221
15	60	60	120	0.90	1.29	0.94	2.54	0.221
16	60	45	120	0.92	1.24	1.01	2.54	0.198
17	60	90	100	0.94	1.11	0.94	2.55	0.24
18	60	75	100	1.05	1.38	0.95	2.55	0.225
19	60	60	100	0.93	1.25	1.05	2.54	0.23
20	60	45	100	1.08	1.18	1.02	2.54	0.214
21	60	90	80	1.10	1.44	0.87	2.55	0.239
22	60	75	80	1.04	1.21	1.07	2.55	0.251
23	60	60	80	1.05	1.20	0.93	2.53	0.239
24	60	45	80	1.25	1.32	0.84	2.54	0.215
25	40	90	120	1.15	1.14	1.01	2.54	0.218
26	40	75	120	1.09	1.17	1.02	2.54	0.21
27	40	60	120	0.94	1.26	0.91	2.54	0.222
28	40	45	120	0.97	1.16	0.89	2.54	0.202
29	40	90	100	1.11	1.37	0.88	2.54	0.213
30	40	75	100	0.95	1.14	0.95	2.54	0.221
31	40	60	100	1.13	1.35	0.87	2.54	0.223
32	40	45	100	1.19	1.33	1.01	2.54	0.209
33	40	90	80	1.05	1.37	1.04	2.55	0.228
34	40	75	80	0.96	1.52	0.96	2.55	0.222
35	40	60	80	1.09	1.44	1.01	2.53	0.223
36	40	45	80	1.18	1.25	0.98	2.54	0.226

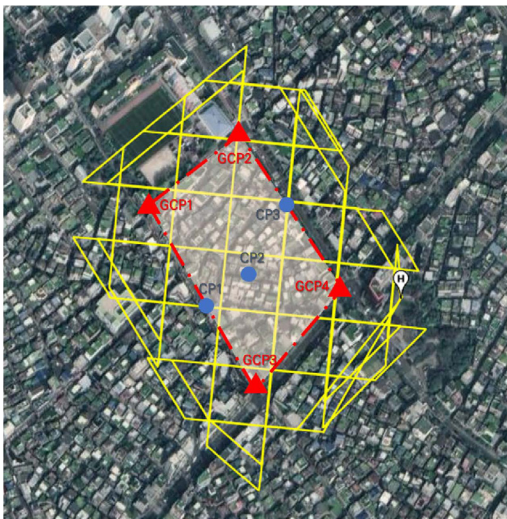


Fig. 3. Flight path and location of GCP and CP (Ex: 80%,90°,100m)

3.2 항공촬영의 정확도 분석

각각의 항공촬영 조건별로 검사점의 오차와 지상기준해상도(GSD: Ground Sample Distance)를 분석한 결과, RMSE는 0.87m에서 1.88m로 분석되었고 지상기준해상도는 항공촬영 조건별로 2.53cm/inch에서 2.55cm/inch의 범위로 분석되었다(Table 3). 각 항공촬영 조건에 따라 정확도가 상이하지만 그 중에서도 중복률이 80%, 촬영각도가 90°, 촬영고도가 80m일 때 위경도 정확도가 가장 높고, 고도의 경우에는 중복률이 60%, 촬영각도가 45°, 촬영고도가 80m일 때 정확도가 가장 높은 것으로 분석되었다(Table 3). 이와 관련하여, 기존 선행연구에서도 항공측량의 정확도를 높이기 위하여 수직각도 및 고각도 촬영에 높은 중복률로 촬영하는 것이 적합하며 (Yoo *et al.*, 2016; Lee and Lee, 2017; Cho *et al.*, 2020), 상대적으로 낮은 촬영고도에서 촬영하는 것이 정확도를 높일 수 있음이 제시된 바가 있다(Kim *et al.*, 2018).

3.3 3차원 공간모형의 정밀도 비교분석

중복률을 제외한 2가지 촬영조건을 고정한 상태에서 중복률 변화에 따른 3차원 공간모형의 정밀도 변화를 분석한 결과, 공통적으로 중복률이 높아질수록 3차원 공간모형의 정밀도가 낮아지는 경향을 보였고, 중복률이 가장 낮을 때 정밀도는 가장 높은 것으로 분석되었다(Table 4, Fig. 4). 해당 결과는 앞서 분석한 정확도 분석결과와는 상이한 경향을 보였는데, 예컨대 정확도 분석결과에서는 높은 중복률에서 정확도가 높은 경향

을 보인 반면, 정밀도 분석결과에서는 오히려 낮은 중복률에서 높은 정밀도를 보이는 것으로 분석되었다. 이와 관련하여, 2차원 측량결과물(정사영상)을 대상으로 정확도를 분석한 기존 연구들에서는 중복률이 높을수록 정확도가 향상됨을 제시한 바가 있지만(Lee and Lee, 2017; Cho *et al.*, 2020), Son *et al.*(2018)의 연구에서는 낮은 중복률에서도 정밀도가 높아질 수 있음을 분석한 바가 있다.

Table 4. Analysis of precision of 3D spatial model by change of overlap

No	Fixed condition		Over lap (%)	RMSE (m)	No	Fixed condition		Over lap (%)	RMSE (m)
	Altitude (m)	Angle (°)				Altitude (m)	Angle (°)		
1	80	45	40	1.37	7	100	75	40	2.07
			60	2.05				60	2.69
			80	3.00				80	3.24
2	80	60	40	1.78	8	100	90	40	2.48
			60	2.42				60	2.94
			80	2.96				80	3.58
			40	2.06				9	120
60	2.86	60	2.05						
80	3.45	80	3.39						
4	80	90	40	1.81	10	120	60	40	1.56
			60	2.74				60	2.48
			80	3.49				80	3.23
			40	1.54				11	120
60	2.23	60	2.66						
80	3.13	80	3.34						
6	100	60	40	1.39	12	120	90	40	1.70
			60	2.41				60	2.99
			80	3.07				80	3.50

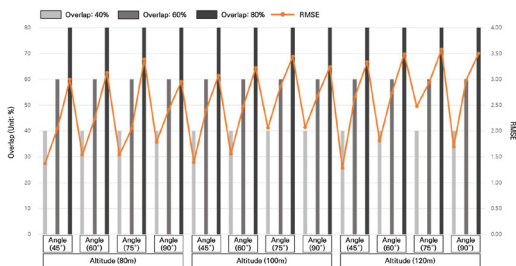


Fig. 4. Analysis of precision of 3D spatial model by change of overlap

촬영각도를 제외한 2가지 촬영조건을 고정한 상태에서 촬

영각도 변화에 따른 3차원 공간모형의 정밀도 변화를 분석한 결과, 촬영각도가 수직에 가까울수록 정밀도가 낮아지는 경향을 보이는 것으로 분석되었다(Table 5, Fig. 5). 특히, 촬영고도 120m 및 중복률 60%에서 그러한 경향이 가장 강한 것으로 분석되었다. 반대로, 촬영고도 120m 및 중복률 80%에서 그러한 경향이 가장 약한 것으로 분석되었다. 또한, 촬영고도별로 유사한 형태로 RMSE의 변화가 분석되었는데, 이는 모든 촬영고도에서 중복률이 높아짐에 따라 정밀도 수준은 낮아지는 경향이 존재하기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 4).

Table 5. Analysis of precision of 3D spatial model by change of angle

No	Fixed condition		Angle (°)	RMSE (m)	No	Fixed condition		Angle (°)	RMSE (m)
	Altitude (m)	Over lap (%)				Altitude (m)	Over lap (%)		
1	80	40	45	1.37	6	100	80	45	3.13
			60	1.78				60	3.07
			75	2.06				75	3.24
			90	1.81				90	3.58
2	80	60	45	2.05	7	120	40	45	1.54
			60	2.42				60	1.56
			75	2.86				75	1.28
			90	2.74				90	1.7
3	40	80	45	3	8	120	60	45	2.05
			60	2.96				60	2.48
			75	3.45				75	2.66
			90	3.49				90	2.99
4	100	40	45	1.54	9	120	80	45	3.39
			60	1.39				60	3.23
			75	2.07				75	3.34
			90	2.48				90	3.5
5	100	60	45	2.23				45	2.23
			60	2.41				60	2.41
			75	2.69				75	2.69
			90	2.94				90	2.94

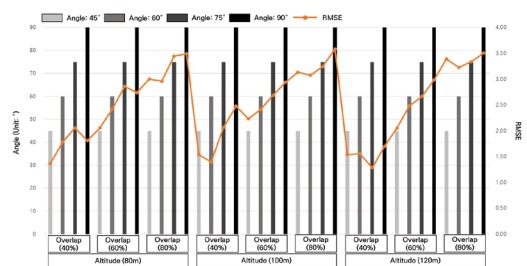


Fig. 5. Analysis of precision of 3D spatial model by change of angle

촬영고도를 제외한 2가지 촬영조건을 고정한 상태에서 촬

영고도 변화에 따른 3차원 공간모형의 정밀도 변화를 분석한 결과, 다른 두 조건과는 달리 촬영고도의 변화에 따른 정밀도 변화상의 일관된 경향성은 분석되지 않았다(Table 6, Fig. 6). 예컨대, 중복률 및 촬영각도에 따라서 촬영고도가 높아질수록 정밀도가 낮아지는 경우도 존재하지만(중복률:80%, 촬영각도:45~60°), 반대로 촬영고도가 낮아질수록 정밀도가 낮아지는 경우도 존재하였다(중복률:40%, 촬영각도:75°/ 중복률 60%, 촬영각도: 75°).

Table 6. Analysis of precision of 3D spatial model by change of altitude

No	Fixed condition		Altitude (m)	RMSE (m)	No	Fixed condition		Altitude (m)	RMSE (m)
	Overlap (%)	Angle (°)				Overlap (%)	Angle (°)		
1	40	45	80	1.37	7	60	75	80	2.86
			100	1.54				100	2.69
			120	1.54				120	2.66
2	40	60	80	1.78	8	60	90	80	2.74
			100	1.39				100	2.94
			120	1.56				120	2.99
3	40	75	80	2.06	9	80	45	80	3
			100	2.07				100	3.13
			120	1.28				120	3.39
4	40	90	80	1.81	10	80	60	80	2.96
			100	2.48				100	3.07
			120	1.7				120	3.23
5	60	45	80	2.05	11	80	75	80	3.45
			100	2.23				100	3.24
			120	2.05				120	3.34
6	60	60	80	2.42	12	80	90	80	3.49
			100	2.41				100	3.58
			120	2.48				120	3.5

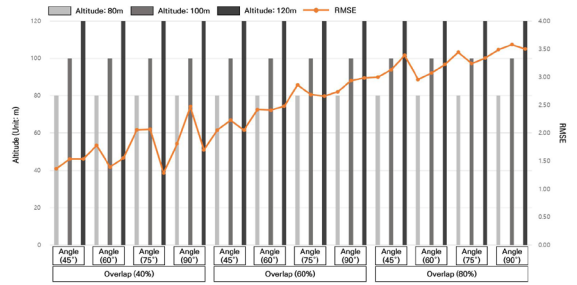


Fig. 6. Analysis of precision of 3D spatial model by change of altitude

각각의 촬영조건별로 촬영조건의 변화에 따른 3차원 공간모형의 정밀도 변화를 분석한 결과, 중복률의 경우에는 중복률이 높아질수록 3차원 공간모형의 정밀도는 낮아지는 경향이 존재함을 확인할 수 있었다. 촬영각도의 경우에도 중복률에 비해 경향이 약하긴 하지만, 촬영각도가 높아질수록 3차원 공간모형의 정밀도는 낮아지는 경향을 보였다. 반면, 촬영고도의 경우에는 고도변화에 따른 정밀도 변화의 유의미한 경향은 없는 것으로 분석되었다(Fig. 7).

본 연구에서는 중복률과 촬영고도가 함께 고려된 기선고도비(Baseline-Height Ratio)를 산정하여 기선고도비의 변화에 따른 3차원 공간모형의 정밀도를 추가적으로 분석하였다. 분석결과, 기선고도비가 커질수록 3차원 공간모형의 정밀도가 높아지는 경향을 보였다(Fig. 8). 기선고도비의 경우, 촬영고도와 기선(촬영간격) 간의 비율을 산정하는 것으로 일반적으로 기선을 촬영고도로 나누어 산정하게 된다. 결과적으로 항공촬영상의 기선이 커지거나, 촬영고도가 낮아질 때 기선고도비는 커질 수 있는 것으로 인식할 수 있다. 이를 고려했을 때, 기선고도비가 커질수록 3차원 공간모형의 정밀도가 높아지는 것은 상대적으로 낮은 촬영고도에서 긴 기선으로 촬영하였을 때 공간모형의 정밀도가 높아지는 것으로 해석할 수 있다.

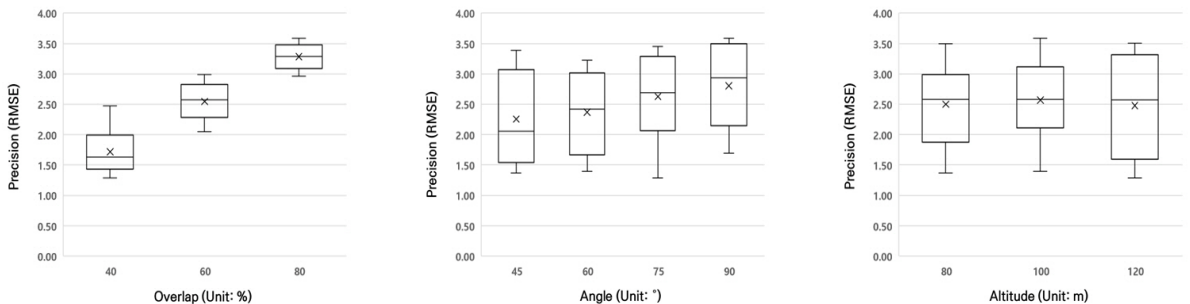


Fig. 7. Box plot of precision of 3D spatial model by change of shooting condition

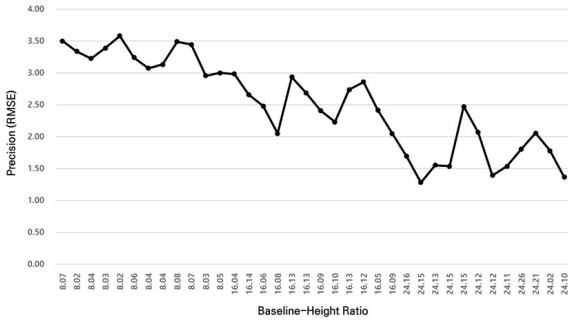


Fig. 8. Analysis of precision of 3D spatial model by change of baseline-height ratio

4. 요약 및 결론

본 연구는 건축물이 고밀도로 밀집해 있는 도심지를 대상으로, 드론 항공촬영 기법을 활용한 3차원 공간모형 구축 시, 항공촬영의 정확도 및 3차원 공간모형의 정밀도를 향상시키기 위한 촬영조건을 분석하였다. 분석결과, 항공촬영 정확도의 경우에는 일반적으로 중복률이 높고, 촬영각도가 수직에 가까울 때 정확도가 높은 것으로 분석되었고, 본 연구의 촬영조건 중, 가장 높은 중복률(80%), 수직촬영각도(90°), 가장 낮은 촬영고도(80m)에서 항공촬영의 정확도가 가장 높게 분석되었다. 이러한 결과는 기존 선행연구와 유사한데, Lee and Lee(2017)의 연구에서는 항공측량의 정확도를 높이기 위해서 수직각도 및 고각도로 촬영하는 것이 적합함을 제시하였고, Yoo et al.(2016)의 연구에서도 높은 중복률로 촬영하는 것이 항공촬영의 정확도를 높이는데 적합함을 제시한 바가 있다. 촬영고도와 관련해서도 낮은 촬영고도에서 항공촬영을 수행했을 때 상대적으로 촬영결과의 정확도가 높아짐이 제시된 바가 있다(Kim et al., 2018).

3차원 공간모형의 정밀도의 경우에는 정확도 분석결과와는 달리, 높은 중복률과 촬영각도에서 3차원 공간모형의 정밀도는 낮아지는 경향을 보였으며, 촬영고도는 유의미한 관련성은 없는 것으로 분석되었다. 단, 기선고도비의 개념을 적용하여 분석한 결과, 항공촬영의 기선고도비가 클수록 3차원 공간모형의 정밀도는 높아지는 경향을 보였으며, 기선고도비의 개념을 고려했을 때 항공촬영의 기선이 늘어나거나 촬영고도가 낮아질수록 3차원 공간모형의 정밀도는 높아지는 경향을 보이는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 결과를 종합했을 때, 항공촬영의 중복률 또는 촬영각도가 커질수록 3차원 공간모형의 정밀도는 낮아질 수 있지만, 높은 기선고도비로 촬영을 했을 때에는 반대로 3차원 공간모형의 정밀도는 높아질 수 있는

것으로 판단된다.

본 연구에서는 건축물이 밀집하여 위치한 도심지를 대상으로 항공촬영의 정확도 및 3차원 공간모형의 정밀도를 향상시키기 위한 촬영조건을 분석하였다는 점에서 의의가 있다고 할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 도심지를 대상으로 연구를 수행하였다는 점에서, 본 연구의 결과는 국내 다양한 도심지를 대상으로 한 항공촬영의 정확도 및 3차원 공간모형 구축의 정밀도를 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 기존 연구들이 나대지, 공터, 캠퍼스 등 상대적으로 건축물의 밀집도가 낮은 지역을 대상으로 항공촬영의 정확도 분석에 집중한 것에 반해, 다수의 건축물이 밀집한 도심지를 대상으로 항공촬영의 정확도 및 3차원 공간모형의 정밀도를 높일 수 있는 항공촬영 조건을 제시했다는 점에서, 본 연구가 지니는 의의는 클 것으로 기대된다.

끝으로, 본 연구의 결과는 향후 다양한 공간규모 및 형태, 건축물의 밀집도 등 다양한 특성을 지니는 공간을 대상으로 한 최적의 항공촬영 조건을 분석하는 연구가 필요함을 시사한다. 본 연구는 서울특별시 도심지 내에서 건축물의 밀집도가 높은 일부지역을 선정하여 분석을 수행하였으나, 향후 다양한 공간의 물리적 특성에 따라 항공촬영의 정확도 및 3차원 공간모형의 정밀도를 높이기 위한 항공촬영 조건은 다를 수 있을 것으로 판단된다. 그러한 점에서 다양한 공간을 대상으로 추가 연구가 수행됨으로써 공간의 특성별로 정확도 및 정밀도를 높일 수 있는 항공촬영 조건을 분석하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C2013282).

References

Son, S.W., Kim, D.W., Yoon, J.H., and Jeon, H.J. (2018), 3D spatial model Construction and Evaluation Using Drone in Terms of Time Efficiency, *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 19, No. 11, pp. 497-505. (in Korean with English abstract)

Oh, J.H., Jang, Y.J., and Lee, C.N. (2018), Accuracy Analysis of Low-cost UAV Photogrammetry for Corridor Mapping,

- Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 6, pp. 565-572. (in Korean with English abstract)
- Cho, J.M., Lee, J.S., and Lee, B.K. (2020), A Study on the Optimal Shooting Conditions of UAV for 3D Production and Orthophoto Generation, *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 38, No. 6, pp. 645-653. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.R., and Lee, W.H. (2017), Comparison of Orthophoto and 3D spatial model ing using Vertical and High Oblique Images taken by UAV, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 25, No. 4, pp. 35-45. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.S., and Hong, I.Y. (2020), Accuracy Analysis of Photogrammetry Based on the Layout of Ground Control Points Using UAV, *Journal of the Korean Cartographic Association*, Vol. 20, No. 2, pp. 41-55. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.D., Park, B.W., and Lee, H.S. (2018), Accuracy Analysis According to GCP Layout Type and Flying Height in Orthoimage Generation Using Low-Cost UAV, *Journal of Society for Geospatial Information Science*, Vol. 26, No. 3, pp. 31-39. (in Korean with English abstract)
- Yoo, Y.H., Choi, J.W., Choi, S.K., and Jung, S.H. (2018), Quality Evaluation of Orthoimage and DSM Based on Fixed-Wing UAV corresponding to Overlap and GCPs, *Journal of Society for Geospatial Information Science*, Vol. 24, No. 3, pp. 3-9. (in Korean with English abstract)
- Yun, B.Y., and Yoon, W.S. (2018), A Study on the Improvement of Orthophoto Accuracy According to the Flight Photographing Technique and GCP Location Distance in Orthophoto Generation Using UAV, *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, Vol. 21, No. 6, pp. 345-354. (in Korean with English abstract)