

# 솔리드 구조의 3차원 모델을 이용한 토공량 산정 방법의 현장 적용성 평가

김종남<sup>1</sup>, 엄대용<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>도도기술단, <sup>2</sup>한국교통대학교 사회기반공학전공

## Evaluation of Field Applicability of Earth-volume Calculation Method Using 3D Model of Solid Structure

Jong-Nam Kim<sup>1</sup>, Dae-Yong Um<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>DODO Engineering

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation

**요약** 본 논문은 무인비행장치(UAV : Unmanned Aerial Vehicle)로부터 획득되는 항공사진을 이용하여 3차원의 실사모형을 생성하고 3차원 모델을 이용한 체적 산출을 위해 구조 변환을 수행하여 솔리드(solid) 모델을 구축한 후 이를 기반으로 토공량을 자동으로 산출할 수 있는 기술을 제안하고 동시에 실제 현장의 적용 가능성을 확인하기 위하여 토공량 산출 작업의 정확성, 효율성 및 경제성을 분석하고자 한 것이다. 각 방법별 토공량 산출에 대해 비교·분석한 결과, 제안한 방법은 정확도 측면에서 기존의 포인트 측정 성과를 이용한 토공량 산출 결과와 비교하여 0.09%의 편차를 확인하였으며, 작업의 효율성 측면에서 약 53%의 작업소요 시간의 단축 효과와 경제성 측면에서 약 49%의 설계비용 절감의 효과를 확인할 수 있었다. 이상의 분석 결과로부터 본 연구에서 제안한 솔리드 구조의 3차원 실사모형을 이용한 토공량의 산출 방법의 현장 적용 가능성과 그 개선 효과를 확인할 수 있었으며, 향후 건설 현장의 프로젝트의 설계 및 관리에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** This paper proposes a technique that can automatically calculate earth volume by creating a 3D model using aerial photographs obtained from a UAV and converting the structure into a solid model. In order to confirm the applicability of this technique in the field, we analyzed the accuracy, efficiency, and economic feasibility of earth-volume calculation work. The results of the method were compared with the result of calculating earth volume using point measurement, and the proposed method had a deviation of 0.09%. In terms of work efficiency, it reduced the time required for work by about 53% and the design cost by about 49%. The analysis results confirmed the field applicability of the method proposed in this study and its improvement effect. In the future, it is expected that the application will be expanded to monitoring of construction sites and management of construction projects.

**Keywords** : UAV, 3D Model, Solid Model, Earth-volume, Structural Transformation

### 1. 서론

최근 ICT(Information and Communications Technology) 융합 기술이 고도화됨에 따라 드론, 자율

주행차, 공간정보, 인공지능 등 국토교통부 7대 신산업과 관련한 정책발표와 함께 스마트시티 및 디지털트윈 구현을 위한 4차 산업혁명 시대가 본격화되고 있다. 이에 국토교통부는 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT), 로봇, 드론,

\*Corresponding Author : Dae-Yong Um(Korea National University of Transportation)

email: dyum@ut.ac.kr

Received September 11, 2023

Accepted December 8, 2023

Revised October 19, 2023

Published December 31, 2023

자율주행차, 가상현실(VR) 등의 주요 핵심기술을 기반으로 정보통신기술(ICT)과 융합된 스마트건설 기술의 활성화를 위하여 「제6차 건설기술진흥기본계획(2018~2022)」, 「스마트건설기술 로드맵」등의 정책을 수립한 바 있다[1]. 또한 계측을 위한 측량 장비들의 첨단화를 통해 고정밀 데이터 취득과 공공 건설사업에의 적용을 위해 2020년 「무인비행장치 측량 작업규정」을 마련하였다[2]. 특히 건설 산업의 특성상 광범위한 영역에 걸친 대규모의 공간 정보의 효율적 획득이 요구됨에 따라 UAV 측량에 기반한 3차원 모델 구축과 이를 이용한 스마트시티, 디지털 트윈 구현을 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다[3].

건설 현장의 경우 공사를 위한 설계 단계에서 토공량 산출은 공사 전체의 설계비용에 직접적으로 영향을 주는 요소임으로 토공량 산출 공정의 효율화와 정확한 토공량 산출이 필요하다. 이에 건설 산업에 있어 효율적인 건설 사업의 관리와 프로젝트의 수행을 위해 UAV를 이용한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 특히 건설 프로젝트의 설계에 있어 토공량의 자동 산출에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. 이용창(2017)은 소형 무인비행장치를 활용하여 영상해석에 의해 토공량을 산정하고 GNSS Network-RTK 지상측량에 의한 토공량과 정량적 비교 분석을 수행하여 작업의 편이성, 신속성 및 경제성 면에서 소형 무인비행체를 활용한 토공량 산정 효율성을 입증하였다[5]. 성지훈 등(2018)은 접근이 어려운 지역에 대해 토공량 산출을 위하여 UAV 측량 방법을 이용하였으며, 그 결과를 GPS, 토탈스테이션 방법과 비교하여 UAV 측량 방법의 적용 가능성을 제시하였다[6]. 조선일(2020)은 UAV 측량에 의해 생성되는 점군자료로부터 생성되는 DSM 및 DEM 모델로부터 토공량을 산출하고 정확도 평가를 함으로써 토공량 산출 가능성을 확인하였다[7]. 박정만(2021)은 UAV 측량을 이용하여 점군자료를 생성하고 이를 이용하여 토공량을 산출하였으며 지상 LiDAR 측량으로 산출한 토공량과 비교·분석하여 정확도 분석을 수행하였다[8]. 또한 김세원과 김영석(2019)은 경제성 측면에서 장점을 갖는 UAV 측량 방법을 이용하여 기존 셀 방식 토공량 산출기법에 단면 중첩방식 알고리즘 및 시스템을 구축하고 토공량을 산출하여 토공량 산출 정확도를 향상시키고자 하였다[9].

국외에서도 스마트 건설과 관련하여 건설 현장의 부지 설계를 위한 토공량 산출을 위해 UAV 활용과 관련한 연구가 진행되고 있다. Akgul 등(2018)은 도로 및 건설계획에 있어 주요 요인인 토공량 산정을 위해 UAV 측량에 의해 자료를 수집을 하여 DEM을 생성하였으며 이로부터

터 토공량 절·성토량을 산출하였다[10]. Al-Tahir 와 Barran(2020) 역시 UAV 측량을 이용하여 DEM을 생성하고 토공량을 산출하고 토탈스테이션으로 수집한 자료와 토공량을 비교한 결과 9.26%의 상대적 차이를 도출하여 무인비행장치 활용 가능성을 제시하였다[11]. 그리고 Siebert와 Teizer(2014)는 UAV 측량으로부터 구축한 DEM을 이용하여 토공량 절·성토량을 산출하여 UAV의 활용 가능성을 제시하며, UAV 시스템 개선 필요성과 향후 활용 가치를 언급하였다[12].

선행 연구들과 같이 본 연구진은 건설현장에서 전체 공정에 큰 영향을 미칠 수 있는 토공량을 효율적으로 정확하게 산출하기 위해 최근 UAV로부터 획득되는 대축척의 항공사진을 이용하여 3차원의 실사모델을 제작하고, 3차원 모델의 구조변환을 통해 솔리드 (solid) 구조의 3차원 실사모델을 생성하여 토공량을 자동으로 산출할 수 있는 연구를 진행한 바 있다[13]. 본 연구에서는 기 연구된 솔리드 구조의 3차원 모델을 이용한 토공량의 자동 산출 방법에 대해 기존 현장의 토공량 산출 방법과 비교한 효율성 및 경제성을 분석하여 현장 적용 가능성을 검증함으로써 건설 현장에서의 활용 가능성을 제시하고자 하였다.

## 2. 솔리드 구조의 3차원 모델을 이용한

### 토공량 산출 정확도 분석

본 연구는 UAV에 의해 획득한 항공사진을 이용하여 3차원의 실사모델을 제작하고 모델의 구조를 솔리드 구조로 변환하여 토공량을 자동 산출할 수 있는 연구 결과의 현장 적용성을 분석하기 위한 것이다. 이를 위해 우선 솔리드 구조의 3차원 모델을 이용하여 토공량을 산출하고 현황측량 기반으로 산출된 토공량과 비교·분석함으로써 토공량 산출 정확도를 분석하여 제안한 방법의 활용 가능성을 검토하였다.

#### 2.1 솔리드 구조의 3차원 모델에 의한 토공량 산출

##### 2.1.1 UAV 항공사진 촬영 및 기준점 측량

건설 현장 적용성 분석을 위해 실제 도시개발이 활발히 이루어지고 있는 부산 공공지구인 약 120m×254m의 공간적 범위를 실험 대상으로 설정하였다. Fig. 1은 현장 적용성 검증을 위해 설정한 대상지를 나타낸 것이다.



Fig. 1. Setting up the research area

대상 지역에 대하여 우선 UAV를 이용하여 항공사진을 촬영하였다. UAV를 이용하여 획득한 항공사진은 공간해상도 5cm/pixel로 총 102매의 항공사진을 획득하였다.

그리고 3차원 모델의 절대좌표 부여를 위해 지상기준점 측량을 수행하였다. 이를 위해 해당 지역에 대한 지상기준점 총 9개 점을 선점하였고, Table 1과 같이 좌표계를 설정하여 VRS-Network RTK 측량을 수행하여 지상기준점 성과를 획득하였다(Table 2).

Table 1. VRS-Network RTK coordinate system setting

Projection	Datum	Y-coord. virtual coordinates(m)
Transverse Mercator	WGS84	200,000
Origin longitude	Origin latitude	X-coord. virtual coordinates(m)
129 °	38 °	600,000

Table 2. Result of GCP surveying (Unit: m)

No.	X	Y	Z
1	183,019.312	192,703.754	4.212
2	183,022.296	192,672.302	4.251
3	183,030.282	192,630.821	4.431
4	182,934.311	192,628.314	4.551
5	182,935.104	192,659.697	4.412
6	182,933.485	192,689.308	4.434
7	182,819.116	192,689.212	4.523
8	182,813.797	192,656.821	4.501
9	182,813.658	192,627.872	4.543

### 2.1.2 B-Rep 솔리드 모델 생성

UAV로부터 획득한 항공사진과 지상기준점을 각각 영상처리 소프트웨어(Pix4d mapper)에 입력하여 3차원 모델(Fig. 2)을 생성하였다. 그리고 3차원 모델을 솔리드 모델로 구조변환을 수행하였다. Fig. 3은 서피스 모델의 폐합 처리 결과를 나타낸 것이며, Fig. 4는 Fig. 3을 기

반으로 B-Rep 솔리드 모델 구조로 변환 결과(Fig. 4(a))와 토공량 산출 가능성을 위한 단면 분할 결과(Fig. 4(b))를 나타낸 것이다.



Fig. 2. 3D reality model (surface structure)

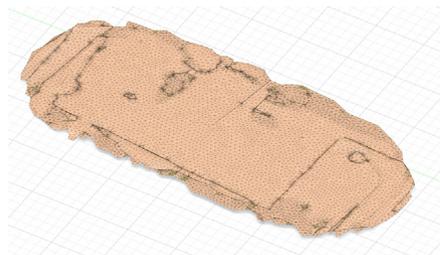
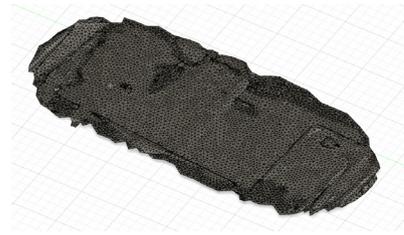
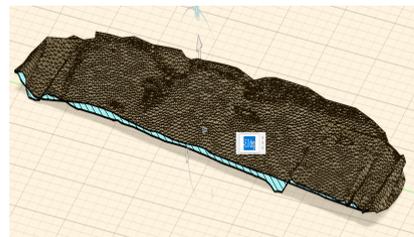


Fig. 3. Result of closing surface model



(a) Transformation of solid structures



(b) Section segmentation result

Fig. 4. B-Rep solid structure conversion results

그리고 토공량 산출을 위해 Fig. 5와 같이 CAD 소프트웨어의 도면과 연계성을 고려하여 DWG로 포맷을 변환하였다.

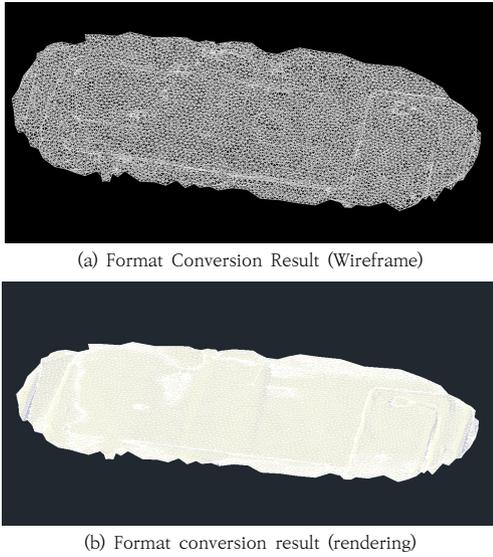


Fig. 5. B-Rep solid model format conversion results

### 2.1.3 B-Rep 솔리드 모델에 의한 토공량 산출

AutoCAD 소프트웨어에 포맷 변환을 완료한 B-Rep 솔리드 모델을 입력하여 토공량을 자동 산출하였다. 그 결과 127,455.99m<sup>3</sup>의 토공량이 산출된 것을 확인할 수 있었다.

## 2.2 현장 현황측량에 의한 토공량 산출

B-Rep 솔리드 모델로부터 산출된 토공량의 정확도 분석을 위해 대상지에 대하여 현황측량을 추가적으로 수행하였다.

### 2.2.1 현황측량

현황측량을 위해 VRS-Network RTK 측량 방법을 이용하였다. 이를 위해 10m×15m의 격자 간격을 설정하여 약 152점에 대하여 측량성과를 획득하였으며, Fig. 6은 현황측량을 위한 점들의 배치현황을 나타낸 것이다.



Fig. 6. Reconnaissance surveying layout

### 2.2.2 실측 및 종횡단면도 작성

획득한 측량 성과를 이용하여 토공량을 산출하기 위해 측량 성과를 Autodesk(社)의 AutoCAD로 입력하여 현황실측도를 작성하였다. 토공량을 산출기 위하여 먼저 실측 현황도로부터 종단면도를 작성하였다.

Fig. 7은 작성한 종단면도를 나타낸 것으로 약 256m에 대한 종단 계획선을 설정하여 작성하였으며, 이를 기준으로 총 15개에 대한 횡단 지점을 설정하여 횡단면도를 작성하였다(Fig. 8).

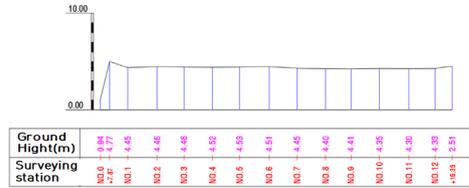


Fig. 7. Result of creating a profile

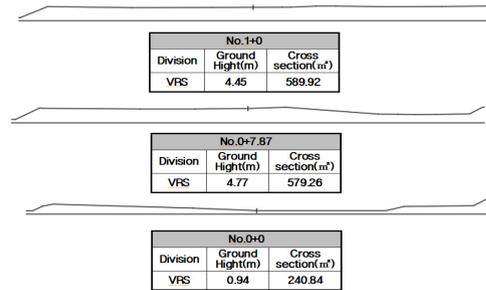


Fig. 8. Result of creating cross-sectional view by point(sample)

### 2.2.3 현황측량 결과에 의한 토공량 산출

현황측량으로부터 획득한 측량성과를 이용하여 토공량을 산출하였다. 이때 산출되는 토공량은 데이터 비교의 최확값 자료로 활용되는 점을 고려하여 실제 건설 현장에서 토공량 산출을 위한 방법인 양단면평균법을 이용하였다. 양단면평균법에 의해 토공량을 산출한 결과, Table 3과 같이 대상지에 대하여 총 127,565.87m<sup>3</sup>의 토공량을 산출할 수 있었다.

Table 3. Earth-volume calculation result based on reconnaissance surveying

Surveying station		Length	Area (m <sup>2</sup> )	Earth-volum(m <sup>3</sup> )
NO	0 +	0.00	0.00	240.84
NO	0 +	7.87	7.87	579.26
NO	1 +	0.00	12.13	589.92
				7,091.07

NO	2	+	0.00	20.00	500.31	10,902.30
NO	3	+	0.00	20.00	504.04	10,043.50
NO	4	+	0.00	20.00	508.69	10,127.30
NO	5	+	0.00	20.00	504.67	10,133.60
NO	6	+	0.00	20.00	481.95	9,866.20
NO	7	+	0.00	20.00	482.86	9,648.10
NO	8	+	0.00	20.00	496.96	9,798.20
NO	9	+	0.00	20.00	500.25	9,972.10
NO	10	+	0.00	20.00	496.16	9,964.10
NO	11	+	0.00	20.00	490.61	9,867.70
NO	12	+	0.00	20.00	531.10	10,217.10
NO	12	+	16.35	16.35	289.39	6,707.51
Sum				256.35	-	127,565.87

### 2.3 토공량 산출 정확도 비교 및 분석

Table 4와 Fig. 9는 각 방법별 토공량 산출 결과를 나타낸 것이다. 각각의 방법에 의해 산출된 토공량의 차이는 있으나 그 차이는 0.09%로 근소한 편차를 보이며, 기초 실험 결과와 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 분석 결과로부터 본 연구에서 제시하고 있는 토공량 산출 방법의 현장 적용 가능성을 입증할 수 있었다.

Table 4. Comparison and analysis of earth-volume calculation results

Division	Earth-volume (m <sup>3</sup> )	comparison (%)
3D Model	127,455.99	0.09 ↓
Reconnaissance surveying	127,565.87	

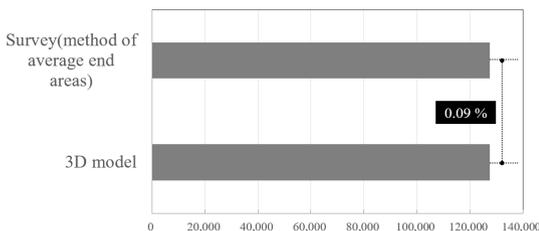


Fig. 9. Comparison and analysis of earth-volume calculation results

## 3. 솔리드 모델 기반 토공량 산출 방법의 효율성 및 경제성 분석

### 3.1 토공량 산출 방법별 작업 효율성 분석

토공량 산출 방법간 효율성 분석을 수행하여 현장 적

용 가능성을 확인하였다. 이를 위해 먼저 토공량 산출 방법에 대한 작업 공정을 설정하였다. 솔리드 모델에 기반한 토공량 산출 방법의 공정은 「무인비행장치를 이용한 공간정보구축 기술개발 및 품셈연구」결과 보고서[14]와 「2022 건설공사표준품셈」[15]을 참고하였다(Table 5). 이때, 품셈에서 제시되어있지 않는 3차원 실사모델 생성, 모델 구조변환, 토공량 산출 공정에 대해서는 작업 과정을 바탕으로 공정을 추가 설정하였다. 그리고 현황측량 기반의 토공량 산출 방법의 공정은 작업 과정을 바탕으로 공정을 설정하였다.

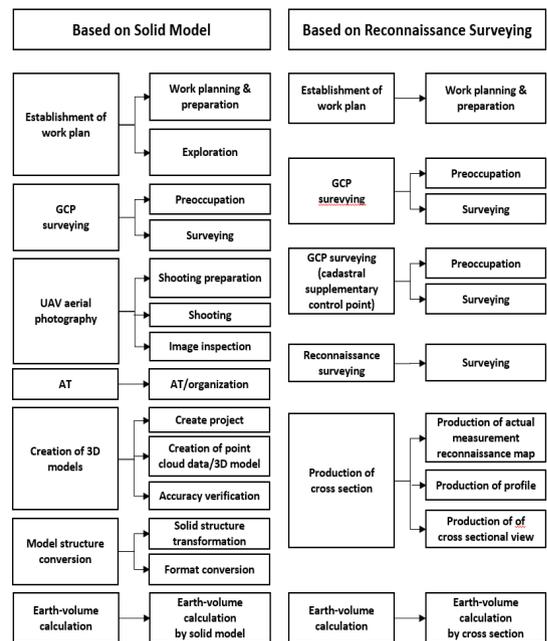


Fig. 10. Setting work process by earth-volume calculation method

Fig. 10은 효율성 분석을 위해 설정한 토공량 산출 방법간 세부 공정을 나타낸 것으로, 공정별 소요시간 산정을 위해 1일 400분을 기준으로 실제 작업 소요 시간과 이에 대한 투입인력계수를 산정하였다.

이때, 솔리드 모델에 기반한 토공량 산출 방법의 공정별 소요 시간의 경우 품셈과 동일한 공정에 대해서는 품셈에서 제시하고 있는 투입 기술자 등급 및 소요시간을 참고하여 산정하였으며, 그 외 공정에 대해서는 실 소요시간을 바탕으로 작업의 주요도 및 난이도에 따라 투입 기술자 등급을 구분하여 소요시간을 산정하였다. 그리고 현황측량 기반의 토공량 산출방법의 공정별 소요시간 역시 주요도 및 난이도에 따라 실제 작업 과정을 바탕으로

Table 5. UAVehicle Survey Standard Specification

(National Geographic Information Institute, 2019; Construction Association of Korea, 2022)

Division	Detailed work	Standard unit	Number of people				Note	
			Engineer					
			Special	advanced	Intermediate	Beginner		
Establishment of work plan	Work planning and preparation	0.25km <sup>2</sup>	(0.5)	(1)	(1)		Within 0 indicate internal business	
	Reconnaissance	0.25km <sup>2</sup>		0.50	0.50			
Installation of air photo signal/GCP survey	Installation of air photo signa	7 points		0.59				
			GCP survey	plane	7 points			0.98
	Elevation	2km				0.26		1.20
				(0.12)	(0.14)	(0.32)		
UAV aerial photograph shooting	flight preparation	0.25km <sup>2</sup>		1.13	0.50	1.13		
	shooting	0.25km <sup>2</sup>		0.19	0.19	0.19		
	Inspection of shooting image and summary of results	0.25km <sup>2</sup>		0.2 (0.2)		0.2 (0.2)		
Aerial triangulation	Aerial triangulation/Organization	0.25km <sup>2</sup>		(0.6)	(0.6)			Within 0 indicate internal business
Orthoimage production	DSM/Orthoimage production	0.25km <sup>2</sup>		(1.3)	(1.3)			
Geographical features depiction	Digital restitution	0.25km <sup>2</sup>	(0.28)	(0.57)	(0.85)	(0.57)		
	vectorization	0.25km <sup>2</sup>		(0.49)				
Quality control/Clean up check	Quality control	0.25km <sup>2</sup>	(0.50)					
	Clean up check	0.25km <sup>2</sup>			(0.50)			
Sum	Orthoimage	0.25km <sup>2</sup>	- (1.12)	3.85 (3.73)	3.44 (4.28)	3.63 (0.83)		
	Digital restitution (Excluding Orthoimage)	0.25km <sup>2</sup>	- (1.40)	3.85 (4.30)	3.44 (5.13)	3.63 (1.40)		
	vectorization	0.25km <sup>2</sup>	- (1.12)	3.85 (4.22)	3.44 (4.28)	3.63 (0.83)		

동일 방법으로 소요시간을 산정하였다. 이렇게 산정한 소요시간은 각 방법간 효율성 분석을 위한 분석 자료로 활용하였으며, 산정한 소요시간을 이용하여 기술자 등급별 투입인력계수를 산출하였다. 이때, 투입인력계수 산출 과정에서 「2022 건설공사 표준폼셈」에서 제시하고 있는 UAV 측량의 공간해상도 및 면적별 매개변수를 적용하였다. Table 6과 Table 7은 UAV측량의 공간해상도 및 면적별 계수를 나타낸 것으로, 건설 현장 적용성 분석을 위한 대상지가 0.25km<sup>2</sup> 이하임에 따라 공정별 증감계수 1을 적용하였으며, UAV로부터 획득한 항공사진의 공간해상도가 5cm/pixel임을 고려하여 증감계수를 1로 적용하였다. 이와 같이 설정한 매개변수를 공정별 소요시간으로부터 산출된 투입인력계수에 적용함으로써 최종적으로 투입인력계수를 산출하였다. Table 8과 9는 방법간 소요시간 산정을 위해 토공량 산출 방법별 투입되는 기술자 등급을 설정한 것이다.

Table 6. Area-by-area coefficient of UAV survey (Construction Association of Korea, 2022)

Work	Area				
	0.25km <sup>2</sup>	0.5km <sup>2</sup>	1km <sup>2</sup>	2km <sup>2</sup>	4km <sup>2</sup>
Work planning and preparation	1				
Reconnaissance	1	1.26	2.12	3.62	6.67
Photograph shooting	1	1.19	1.63	2.47	4.16
Aerial triangulation	1	1.26	2.12	3.62	6.67

Table 7. Coefficients by spatial resolution of UAV survey (Construction Association of Korea, 2022)

GSD	3cm	5cm	비고
Coefficients	1.07	1	

Table 8. Calculation of earth-volume based on UAV surveying engineer grade for each process

Division		Input engineer grade			
		Express	Advanced	Intermediate	Beginner
Establishment of work plan	Work planning and preparation	○	○	○	-
	Exploration	-	○	○	-
GCP survey	Preoccupation	○	○	-	-
	Surveying	-	○	○	○
UAV aerial photograph shooting	Shooting preparation	-	○	○	○
	Shooting	-	○	○	○
	Image inspection	-	○	-	○
Aerial triangulation	AT/Organization	-	○	○	-
Creation of 3D models	Create Project	-	○	-	-
	Creation of Point cloud data/3D model	-	○	-	-
Model structure conversion	Accuracy Verification	○	○	-	-
	Solid structural transformation	-	○	-	-
Earth-volume calculation	Format conversion	-	○	-	-
	Earth-volume calculation by solid model	○	○	-	-

Table 9. Calculation of earth-volume based on reconnaissance surveying engineer grade for each process

Division		Input engineer grade			
		Advanced	Intermediate	Beginner	
Establishment of work plan	Work planning and preparation	Time	○	○	○
GCP survey(C.P)	Preoccupation	Time	-	-	○
	Survey	Time	-	-	○
GCP survey (cadastral supplementary control point)	Preoccupation	Time	-	○	-
	Surveying	Time	-	○	-
Reconnaissance surveying	surveying	Time	-	○	-
Production of cross section	Production of actual measurement reconnaissance map	Time	○	○	-
	Production of profile	Time	○	○	-
	Production of cross sectional view	Time	○	○	-
Earth-volume calculation	Earth-volume calculation by cross section	Time	○	○	-

3.1.1 솔리드 모델 기반 토공량 산출 작업 효율성 분석

솔리드 모델에 기반한 토공량의 산출을 위한 공정별 투입인력 및 소요시간을 산정하였다. Table 10은 솔리드 모델에 기반한 토공량 산출을 위한 공정별 투입인력 및 소요시간 산정 결과를 나타낸 것으로 전체 공정에 대한 소요시간은 3,835분으로 산출된 것을 확인할 수 있었으며, 그 중 작업계획 과정에서 1,200분, 절대좌표 부여

Table 10. Calculation of earth-volume based on UAV survey time required for each process and input manpower factor

Division		Required time by input manpower (minutes)					Sum (minutes)
		Engineer grade					
		Express	Advanced	Intermediate	Beginner		
Establishment of work plan	Work planning and preparation	Time	240	480	480	-	1,200
	factor	0.600	1.200	1.200	-	-	3.000
Exploration	Time	-	240	240	-	480	
	factor	-	0.600	0.600	-	1.200	
GCP survey	Preoccupation	Time	240	240	-	480	
	factor	0.600	0.600	-	-	1.200	
Survey	Time	-	90	90	90	270	
	factor	-	0.225	0.225	0.225	0.675	
UAV aerial photography	Preparation	Time	-	10	10	10	30
		factor	-	0.025	0.025	0.025	0.075
	Shooting	Time	-	30	30	30	90
		factor	-	0.075	0.075	0.075	0.225
Image inspection	Time	-	15	-	15	30	
	factor	-	0.038	-	0.038	0.075	
AT/Organization	Time	-	120	120	-	240	
	factor	-	0.3	0.3	-	0.600	
Create 3D model	Create Project	Time	-	15	-	15	
		factor	-	0.038	-	-	0.038
	Creation of Point cloud data/3D model	Time	-	180	-	-	180
		factor	-	0.450	-	-	0.450
Accuracy Verification	Time	120	120	-	-	240	
	factor	0.300	0.300	-	-	0.600	
Model structure conversion	Solid structural transformation	Time	-	400	-	400	
		factor	-	1.000	-	-	1.000
	Format conversion	Time	-	60	-	60	
		factor	-	0.150	-	-	0.150
Earth-volume calculation	Earth-volume calculation by solid model	Time	60	60	-	120	
		factor	0.150	0.150	-	-	0.300
Sum of required time (minutes)						3,835	

를 위해 수행하는 지상기준점측량 공정에서 750분, 이를 이용한 영상처리 공정에서 240분, 3차원 모델 생성공정에서 435분으로 전체 공정 대비 각각 31.3%, 19.6%, 6.3%, 11.3%로 대부분의 소요 시간을 필요로 하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.1.2 현황측량 기반 토공량 산출 작업 효율성 분석

Table 11은 현황측량 기반 토공량 산출을 위한 공정별 투입인력 및 소요시간 산정 결과를 나타낸 것이다. 현황측량을 이용하여 획득한 측량성과에 기반한 토공량 산출을 위해 소요되는 공정별 투입인력 및 소요시간을 산

Table 11. Calculation of earth-volume based on reconnaissance surveying time required for each process and input manpower factor

Division			Required time by input manpower (minutes)			Sum (minutes)
			Engineer grade			
			Advanced	Intermediate	Beginner	
Establishment of work plan	Work planning and preparation	Time	240	480	480	1,200
		factor	0.6	1.2	1.2	3,000
GCP survey (C.P)	Preoccupation	Time	-	-	60	60
		factor	-	-	0.150	0.150
	Survey	Time	-	-	80	80
		factor	-	-	0.200	0.200
GCP survey (cadastral supplementary control point)	Preoccupation	Time	-	30	-	30
		factor	-	0.075	-	0.075
	Survey	Time	-	80	-	80
		factor	-	0.200	-	0.200
Reconnaissance surveying	surveying	Time	-	1,520	-	1,520
		factor	-	3,800	-	3,800
Production of cross section	Production of actual measurement reconnaissance map	Time	800	800	-	1,600
		factor	2.000	2.000	-	4,000
	Production of profile	Time	800	800	-	1,600
		factor	2.000	2.000	-	4,000
	Production of cross sectional view	Time	800	800	-	1,600
		factor	2.000	2.000	-	4,000
Earth-volume calculation	Earth-volume calculation by cross section	Time	200	200	-	400
		factor	0.500	0.500	-	1,000
Sum of required time (minutes)						8,170

정한 결과, 전체 소요시간은 8,170분으로 산정된 것을 확인할 수 있었으며, 그 중 작업계획 과정에서 1,200분, 현황측량 1,520분, 실측현황도 작성 부터 횡단면 작성까지 단면도 작성 공정에 4,800분으로 각각 14.7%, 18.6%, 58.8%로 대부분의 소요시간을 차지하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.1.3 작업 효율성 비교 및 분석

각 방법 간의 소요시간을 산정하고 이를 비교·분석하여 토공량 산출을 위한 효율성 분석을 수행하였다. 먼저 솔리드 모델에 기반한 공정별 소요시간은 총 3,835분, 현황측량 기반의 소요시간은 8,170분으로 분석되었다. 추가적으로 토공량 산출 방법간 소요시간을 직접적으로 비교·분석하기 위하여 각 방법별 공정을 1) 기초자료 획득 2) 자료처리 3) 토공량 산출로 구분하여 기존 공정의 소요시간을 재분류하였다(Table 12).

Table 12. Comparison and analysis of time required for each process between earth-volume calculation methods

Division	Time required to calculate earth-volume based on solid model (minutes)	Time required to calculate earth-volume based on field survey (minutes)	Comparison (%)
Acquisition of basic data	2,580	2,970	13.13% ↓
Data processing	1,135	4,800	76.35% ↓
Earth-volume calculation	120	400	70.00% ↓
Sum	3,835	8,170	53.06% ↓

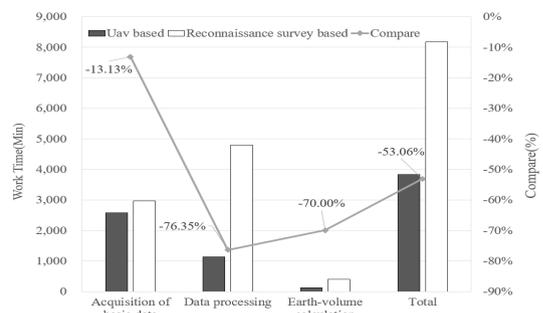


Fig. 11. Comparison and analysis of time required for each process between earth-volume calculation methods

Fig. 11은 토공량 산출 방법 간 공정별 소요시간 비교 분석 결과를 나타낸 것으로, 각 방법간 소요시간이 전체 공정에서 13.13%~76.35%의 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 특히 자료처리 공정에 있어 현황 측량을 이용한 방법의 경우 측량성과 정리 측면의 실측 현황도 작성과 토공량 산출을 위한 중·횡단면도 작성 단계에서 76.35%로 가장 크게 상대적 차이를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 분석 결과는 솔리드 모델 기반 토공량 산출 방법은 지상기준점측량을 제외한 무인항공사진촬영, 3차원 모델 생성, 토공량 산출 공정이 자동화가 가능한 반면 현황측량 기반 토공량 산출 방법은 현황측량부터 토공량 산출까지 전체 공정이 수동적 작업이 필요함에 따라 큰 차이가 발생한 것으로 판단된다.

토공량 산출 방법별로 소요시간을 산출하여 비교·분석한 결과, 본 연구에서 제시한 솔리드 모델을 이용한 토공량 산출 방법이 기존의 현장 현황측량 방법에 의한 토공량 산출 소요시간에 비해 53.06%의 단축효과를 확인할 수 있었으며, 이러한 결과는 향후 건설 현장에 적용하였을 경우 건설 현장의 신설계획, 변화에 따른 설계변경 등을 위해 신속한 데이터 구축 및 토공량 산정을 위해 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.2 토공량 산출 방법별 경제성 분석

건설 현장 적용성 분석을 위하여 작업 경제성 분석을 수행하였다. 경제성 분석을 하기 위해 기초자료 구축 및 데이터 처리를 위한 장비 사용료 등에 대해서는 사용자가 장비를 보유하고 있는 것으로 가정하여 이들에 대한 소요비용은 제외하였으며, 투입인력에 대한 소요 비용을 산출하여 분석하였다. 투입인력에 대한 소요비용을 산출하기 위해 활용한 입력 데이터는 효율성 분석을 위해 산정한 소요시간에 대한 투입기술자의 투입인력계수를 활용하였으며, 「2021년도 측량업체 임금실태조사 보고서」[16]의 ‘측량기술자 노임단가’를 적용하였다.

#### 3.2.1 솔리드 모델 기반 토공량산출 소요비용 분석

솔리드 모델 기반 토공량의 산출을 위해 Table 10에서 산출된 각 방법별 투입인력계수에 노임단가를 반영하여 필요한 일위대가를 Table 13과 같이 산출하여 최종적인 소요비용을 산출하였다. 산출 결과 총 2,051,366원의 소요비용이 산출되었다.

Table 13. Calculation of earth-volume based on UAV survey cost required for each process

Division		Engineer grade	Unit price (won)	Manpower factor	Amount (won)
Establishment of work plan	Work planning and preparation	Express	249,499	0.600	149,700
		Advanced	218,088	1.200	261,706
		Intermediate	189,335	1.200	227,202
	Exploration	Advanced	218,088	0.600	130,853
		Intermediate	189,335	0.600	113,601
	GCP survey	Preoccupation	Express	249,499	0.600
Advanced			218,088	0.600	130,853
Survey		Advanced	218,088	0.225	49,070
		Intermediate	189,335	0.225	42,601
		Beginner	158,319	0.225	35,622
UAV aerial photography		Shooting preparation	Advanced	218,088	0.025
	Intermediate		189,335	0.025	4,734
	Beginner		158,319	0.025	3,958
	Shooting	Advanced	218,088	0.075	16,357
		Intermediate	189,335	0.075	14,201
		Beginner	158,319	0.075	11,874
	Image inspection	Advanced	218,088	0.038	8,179
		Beginner	158,319	0.038	5,937
	AT	AT/Organization	Advanced	218,088	0.300
Intermediate			189,335	0.300	56,801
Create 3D model	Create Project	Advanced	218,088	0.038	8,179
	Creation of Point cloud data/3D model	Advanced	218,088	0.450	98,140
	Accuracy Verification	Express	249,499	0.300	74,850
Advanced		218,088	0.300	65,427	
Model structure conversion	Model structure conversion	Advanced	218,088	1.000	218,088
	Convert Construction	Advanced	218,088	0.150	32,714
Earth-volume calculation	Calculation of earth-volume based on solid model	Express	249,499	0.150	37,425
		Advanced	218,088	0.150	32,714
Sum(won)					2,051,366

#### 3.2.2 현황측량 기반 토공량 산출 작업 소요비용 분석

현황측량 기반 토공량의 산출을 위해 Table 11에서 산출된 각 방법별 투입인력계수에 노임단가를 반영하여 필요한 일위대가를 Table 14와 같이 산출하여 최종적인 소요비용을 산출하였다. 산출 결과 총 4,023,241원의 소요비용이 산출되었다.

Table 14. Calculation of earth-volume based on reconnaissance surveying cost required by process

Division		Engineer grade	Unit price (won)	Manpower factor	Amount (won)
Establishment of work plan	Work planning and preparation	Advanced	218,088	0.600	130,853
		Intermediate	189,335	1.200	227,202
		Beginner	158,319	1.200	189,983
GCP survey (C.P)	Preoccupation	Beginner	158,319	0.150	23,748
	Survey	Beginner	158,319	0.200	31,664
GCP survey (cadastral supplementary control point)	Preoccupation	Intermediate	189,335	0.075	14,201
	Survey	Intermediate	189,335	0.200	37,867
Reconnaissance surveying	Reconnaissance surveying	Intermediate	189,335	3.800	719,473
Cross-section map Production	Production of actual measurement reconnaissance map	Advanced	218,088	2.000	436,176
		Intermediate	189,335	2.000	378,670
	Production of profile	Advanced	218,088	2.000	436,176
		Intermediate	189,335	2.000	378,670
	Production of cross sectional view	Advanced	218,088	2.000	436,176
		Intermediate	189,335	2.000	378,670
Earth-volume calculation	Earth-volume calculation by cross section	Advanced	218,088	0.500	109,044
		Intermediate	189,335	0.500	94,668
Sum(won)					4,023,241

3.2.3 작업 경제성 비교 및 분석

각 방법간 공정별 투입인력계수를 이용하여 소요비용을 산출하고 경제성 분석을 수행하였다. 솔리드 모델을 이용한 토공량의 산출 방법의 공정별 소요 비용을 산출한 결과 총 2,051,366원으로 산출되었으며, 현황측량에 기반한 토공량의 산출 방법의 공정별 소요 비용은 총 4,023,241 원으로 산출되었다. 추가적으로 각 방법간 소요비용 차이를 직접 비교·분석하기 위해 소요시간 분석과 동일하게 기존 공정의 소요 비용을 재분류하였다 (Table 15).

Fig. 12는 토공량 산출 방법간 공정별 소요비용의 비교·분석 결과를 나타낸 것으로 이를 통하여 각 방법간 소요 비용이 전체 공정에서 0.97%~74.65%의 차이를 나타낸 것을 확인할 수 있었다. 특히 소요시간 산정 결과에서

가장 큰 차이를 보이는 자료처리 공정에서 74.65%로 가장 크게 상대적 차이를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 15. Comparison and analysis of costs for each process among earth-volume calculation methods

Division	Cost required to calculate earth-volume based on solid model (minutes)	Cost required to calculate earth-volume based on field survey (minutes)	Comparison (%)
Acquisition of basic data	1,361,601	1,374,991	0.97 ↓
Data processing	619,626	2,444,538	74.65 ↓
Earth-volume calculation	70,139	203,712	65.57 ↓
Sum	2,051,366	4,023,241	49.01 ↓

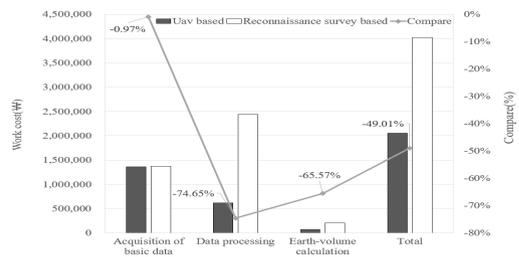


Fig. 12. Comparison and analysis of costs for each process among earth-volume calculation methods

토공량 산출 방법별로 소요비용을 산출하여 비교·분석한 결과 본 연구에서 제시한 솔리드 모델에 기반한 토공량 산출 방법이 기존 일반적 방법에 의한 토공량 산출 비용에 비해 49.01%의 소요비용 절감 효과를 확인할 수 있었으며, 이러한 결과는 향후 건설 현장에 적용하였을 경우 데이터 구축 및 토공량 산정을 위해 비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 UAV 측량에 의해 획득되는 솔리드 구조의 3차원 모델을 기반으로 토공량을 자동으로 산출할 수 있는 방법을 제안하고, 제안한 토공량 산출 방법의 실제 건설 현장의 적용 가능성을 검토하였다. 먼저, 도시개발이 진행중인 대상지에 대하여 UAV 측량에 의해 획득

되는 항공사진을 이용하여 솔리드 구조의 3차원 모델을 생성하고 토공량을 산출하였다. 그리고 기존 전통적 현황측량 방법에 의해 단면도를 작성하여 토공량을 산출함으로써 각 방법에 의해 산출된 토공량을 비교·분석하였다. 그 결과, 솔리드 구조의 3차원 모델을 기반으로 산출한 토공량은 127,455.99m<sup>3</sup>, 현황측량의 측량성과를 이용하여 산출한 토공량은 127,565.87m<sup>3</sup>로 0.09%의 편차를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 건설 현장의 적용성을 분석하기 위하여 각 방법간 효율성 및 경제성을 분석하였다. 그 결과 솔리드 모델을 이용한 토공량 산출 방법이 효율성 측면으로는 53.06%의 소요시간 단축 효과를 확인할 수 있었으며, 경제성 측면으로는 49.01%의 비용 절감 효과를 확인할 수 있었다. 이러한 분석 결과를 토대로 본 논문에서 제시한 솔리드 구조의 3차원 모델을 이용한 토공량의 자동 산출 방법을 건설 현장에 적용할 경우, 정확한 토공량 산출은 물론 작업 과정의 신속성과 비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] T. H. Jeong, Y. W. Lee, S. M. Jeon, "Smart Construction Technology-based Safety Management Application Cases in the Era of the 4th Industrial Revolution", *Construction Technology Ssangyong*, Vol.78, pp.44-49, 2021.
- [2] National Geographic Information Institute, 「Unmanned aerial vehicle survey work regulations」, 2020.
- [3] D. Y. Eom, "3D Reality Model Generation Technique of Spatial Objects by Unmanned Aerial Photogrammetry", *Broadcasting and Media Magazine*, Vol.22, No2, pp.44-52, 2017.
- [4] S. W. Kwon, S. M. Kang, "Global Map Model generation technology for earthworks using UAV", *Korea Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.16, No.4, pp.12-17, 2015.
- [5] Y. C. Lee, "Validation on the Utilization of Small-scale Unmanned Aerial Systems(sUAS) for Topographic Volume Calculations", *Journal of Cadastre & Land Information*, Vol.47, No.1, pp.111-126, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.22640/lxsiri.2017.47.1.111>
- [6] J. H. Seong, Y. K. Han, W. H. Lee, "Earth-Volume Measurement of Small Area Using Low-cost UAV", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol.36, No.4, pp.279-286, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2018.36.4.279>
- [7] S. I. Cho, *A Study on Estimation of Earthwork Volume Using UAV for BIM*, Ph.D dissertation, Chung Nam National University, Daejeon, Korea, 2020.
- [8] J. M. Park, *Accuracy Analysis of Earth-volume Calculation By Unmanned Aerial Vehicle Survey*, Master's thesis, Gyeongsang National University, Jinju, Korea, 2021.
- [9] S. W. Kim, Y. S. Kim, "Development and Evaluation of High-precision Earth-work Calculating System using Drone Survey", *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.18, No.4, pp.87-95, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.12814/ikgss.2019.18.4.087>
- [10] Akgul, M., Yurtseven, H., Gulci, S., and Akay, A. E., "Evaluation of UAV- and GNSS-Based DEMs for Earthwork Volume", *Arabian journal for science and engineering*, Vol.43, No.4, pp.1893-1909, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2811-9>
- [11] Al-Tahir, R., and Barran, T. (2020), Earthwork Volumetrics with Unmanned Aerial Vehicles: Comparative Study, The International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, 2020.6, The UWI, St. Augustine  
DOI: <https://doi.org/10.47412/KLNQ8966>
- [12] 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, May 2014, pp.1-14.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004>
- [13] J. N. Kim, D. Y. Um, "A Study on Automatic Calculation of Earth-volume Using 3D Model of B-Rep Solid Structure", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol.40, No.5, pp.403-412, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2022.40.5.403>
- [14] S. B. Lee, Result Report of Spatial Information Construction Technology Development and Quality Research using Unmanned Aerial Vehicles, National Geographic Information Institute, Korea, 2019.
- [15] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2022 Construction Standard Specification, Construction Association of Korea, Korea, 2022.
- [16] Korean Association of Spatial Information, Surveying & Mapping, Surveying Company Wage Status Survey Report, Korea, 2021.

김 종 남(Jong-Nam Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 충주대학교 건축학과 대학원 (공학석사)
- 2014년 2월 : 한국교통대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2023년 2월 : 한국교통대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2014년 7월 ~ 현재 : 도도기술단 대표

<관심분야>

지형공간정보공학

---

엄 대 용(Dae-Yong Um)

[정회원]



- 1997년 2월 : 충남대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1999년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2004년 4월 ~ 현재 : 한국교통대학교 사회기반공학전공 교수

<관심분야>

지형공간정보공학, 사진측량학