

무인항공기를 활용한 수질개선 생태계서비스 가치 평가 방안 연구*

- 경기도 광주시 광동리 일원 매수토지를 중심으로 -

문동철^{1),2)} · 길승호³⁾

¹⁾한강수계관리위원회 전문위원 · ²⁾강원대학교 대학원 조경학 학생 · ³⁾강원대학교 생태조경디자인학과 교수

Research on valuation of ecosystem services for water quality improvement using unmanned aerial vehicles*

- Focusing on Purchased land in Gwangdong-ri area, Gwangju city(Gyeonggi) -

Mun, Dong-Choel^{1),2)} and Kil, Sung-Ho³⁾

¹⁾ Han Gang Watershed Management Committee,

²⁾ Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kangwon National University,

³⁾ Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University.

ABSTRACT

The riparian area plays a crucial role in maintaining the balance between the aquatic and terrestrial ecosystems. The Korean government has recognized the importance of protecting riparian areas and has taken steps to purchase land and create ecobelt to reduce non-point source pollutants(NSPs) that can negatively impact water quality. However, selecting the catchment area and calculating the pollution load can be challenging due to the small area of the purchased land and the limitations of low-resolution DEMs. To address these challenges, this study proposes the use of unmanned aerial vehicles(UAVs) to create a high-resolution DEM and calculate the pollution load through land cover analysis. This approach can provide a more accurate representation of the land use status and help to identify areas that are contributing to NSPs. The quantitative comparison of the difference in water quality improvement ecosystem services according to the scenarios of additional catchment areas shows that even land purchased for the same amount of money may have different ecosystem service values, and this was quantitatively calculated. This can be used to prioritize future land acquisition. Overall, this

* 본 연구는 한강수계관리위원회에서 제공하는 자료를 활용하여 수행하였으며 이에 감사드립니다.

First author : Mun, Dong Cheol, Han Gang Watershed Management Committee,

Tel : +82-31-790-2456, E-mail : dcmun81@gmail.com

Corresponding author : Kil, Sung Ho, Department of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University,

Tel : +82-33-250-8342, E-mail : sunghokil@kangwon.ac.kr

Received : 18 February, 2023. **Revised** : 13 February, 2024. **Accepted** : 5 February, 2024

study's approach could provide valuable insights into the effectiveness of ecobelt in reducing NSPs and inform future efforts to protect riparian areas in Korea and beyond.

Key Words: *Ecosystem Services, Riparian Area, Ecobelt, Unmanned Aerial Vehicle, DEM, NSPs*

I. 서 론

수변지역(riparian zone)은 수생태계와 육상생태계를 연결하는 완충지대로 다양하고 특이한 생태계서비스(ecosystem services)를 제공한다(Cole et al., 2020; Hanna et al., 2019). 국내에서는 수변지역에 대해 수질 보전 및 개선을 목적으로 상수원보호구역, 수변구역으로 지정하고, 유역 단위 관리 방법의 일환으로 수변생태벨트(ecobelt)를 조성하고 있다. 건강한 수변생태벨트를 확보하기 위해 정부는 해당 지역의 토지를 매수하고 있지만 매도 의사가 있는 토지소유주와 협의하여 매수하는 방식으로 제도 자체의 한계를 가지고 있어, 하천과 거리가 멀고 산발적인 위치의 토지를 매수하는 경우가 발생하고 있다. 수변생태벨트는 생태계 연결성 증대, 탄소흡수원, 자연재해 예방 기능 제공 등 다양한 생태계 서비스를 제공하기 때문에 수질개선 기능 증진을 포함하여 생태계서비스를 제공할 수 있는 토지를 우선적으로 매수할 수 있도록 지속적인 관심이 필요하다(ME and HGWMC, 2024).

생태계서비스는 인간이 생태계로부터 얻는 혜택으로 정의되며(생물다양성법 제2조), 지구단위, 국가단위 그리고 최근에는 지역단위로 확장하여 연구가 활발히 이루어지고 있다(Ahm et al., 2020, Jung et al., 2021, Li et al., 2021). 사회-생태시스템 분석에 적합한 생태계서비스 가치평가 및 지도화 방법론을 제시한 연구를 통해 공간 정보와 연계한 생태계서비스 가치 평가의 활용 방안을 제안한 연구가 있다(Yi, 2022). 특히, Pack et al.(2021)은 전라환경영향평가 시 입지 판단을 위한 의사결정 기준 제시를 위해 시나리오별 생

태계서비스 평가결과를 활용하여 개발계획 및 정책계획의 적정성과 입지 타당성 평가 활용 가능성을 연구하여 생태계서비스 연구의 유용성을 제시하기도 하였다.

지속가능한 수변생태벨트를 형성하기 위해서는 수질개선 생태계서비스가 무엇보다 중요하다. 우리나라 전체 수질오염원 중 비점오염원에서 배출되는 오염부하량(BOD, T-P)은 점오염원의 2배 이상 차지하고 있다(ME et al, 2020). 점오염원은 배출되는 지점, 경로, 배출량이 특정되어 있지만 비점오염원은 불특정하게 수질오염물질을 배출하기 때문에 상대적으로 관리가 어렵다(Park et al., 2019). 비점오염원을 매수토지로 유입하여 처리하는 것은 효과적인 수질개선 방법이 될 수 있다(EPA, 2019). 비점오염 저감을 위한 설계 요소를 매수토지에 적용하기 위해서는 오염부하량 처리 용량을 산정해야 하는데, 필수적으로 집수구역(catchment area)의 구획이 선행되어야 한다. 집수구역은 강우가 흘러드는 주변지역을 의미하며, 지형의 영향을 가장 크게 받는다. 일반적인 비점오염저감시설은 주로 도로, 산업단지, 도시지역 등에 설치되기 때문에 집수구역에서 불투수 포장면을 따라 이동하는 강우 유출수의 흐름 방향은 예측이 가능하다. 필요에 따라서는 적절한 경사도를 주어 강우유출수가 차집되도록 설계가 가능하다. 하지만 매수토지와 그 주변지역은 자연 배수체계를 가지고 있어 강우유출수의 흐름 방향을 예측하기 어렵고 인위적으로 유입시키는 것에도 한계가 있다. 일부 수변생태벨트 설계 시 지상측량을 통해 지형지적도를 작성하여 집수구역을 설정하고 있지만 투입하는 비용에 비해 신뢰성, 객관성이 결여되

어 합리적인 판단을 하는데 어려움을 겪고 있다 (EPA, 2019).

최근 무인항공기(UAV, unmanned aerial vehicle)가 보급되면서 무인항공기가 가지는 기술적인 이점을 활용하여 기존 문제를 해결하려는 시도가 증가하고 있다(Song, 2019). 무인항공기 사진측량을 통해 저비용으로 시의성 있는 고해상도 공간정보를 확보할 수 있다(Ahmed and Mahmud, 2022; Kim, 2018; Meinen and Robinson, 2020; Librán-Embida et al., 2020). 특히 건설, 토목 분야에서 지적, 지형 분석 및 토공량 산출 등을 위해 많이 활용하고 있는 무인항공기 사진측량은 SIFT(scale invariant feature transform)와 SfM(structure from motion)이 대표적인 기술이다. SIFT는 특징점과 그 주변의 모양 변화에 대한 경향을 파악하여 그 경향을 비교함으로써 물체를 구별하는 방식이며, SfM은 2차원 영상으로부터 3차원 형상을 구현하는 방법으로 외부 표정요소(exterior orientation parameter)와 관계없이 자동으로 수많은 영상들을 정합(matching)하고 점군(point cloud)를 생성할 수 있다(Fitzgibbon and Zisserman, 1998). 이러한 알고리즘으로 3차원 지형 구현이 가능하여 Figure 1.과 같이 DSM(digital surface model)과 DTM(digital terrain model) 제작이 가능하다(Lee et al., 2021; Lowe, 1999; Xu et al., 2020).

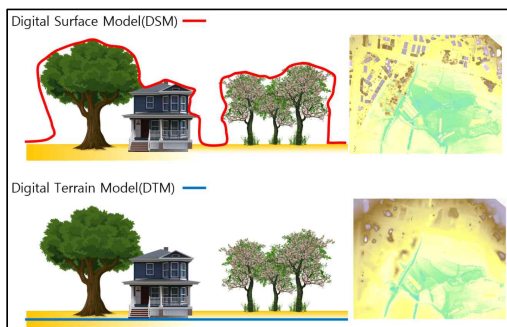


Figure 1. Concept of DSM and DTM(Ahmed and Mahmud, 2022)

Li et al.(2021)은 효율적인 보호지역 관리를 위해 RKES(regional key ecosystem service)를 선정하여 지역 기반으로 생태계서비스 핵심기능을 설정하여 관리하는 것이 중요하다고 하였다. 본 연구는 그동안 수질개선 생태계서비스 증진을 목적으로 토지를 매수하여, 수변생태벨트로 조성하기 위해 어려움으로 지적되었던 미지형 집수구역 설정을 무인항공기를 활용하여 개선하고자 하였다. 또한 시나리오별 비교 분석을 통해 수질개선 생태계서비스 가치를 평가하여 효율적인 토지매수 및 수변생태벨트 조성을 위한 시사점을 도출하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구의 흐름

무인항공기 촬영을 통해 취득한 영상을 이용하여 고해상도의 정사영상, DEM을 제작하였다. 이와 함께 연속지적도, 수치지형도, 세분류 토지 피복지도 등 공개된 공간정보를 수집하였다. 이러한 공간정보는 GIS 프로그램으로 지적중첩도, 흐름방향도, 흐름누적도 등으로 재가공하여 집수구역 설정 및 오염부하량 산정 등 공간분석에 활용하였다. 마지막으로 토지매수 시나리오에 따라 변화하는 수질개선 생태계서비스 가치를 평가하였다(Figure 2).

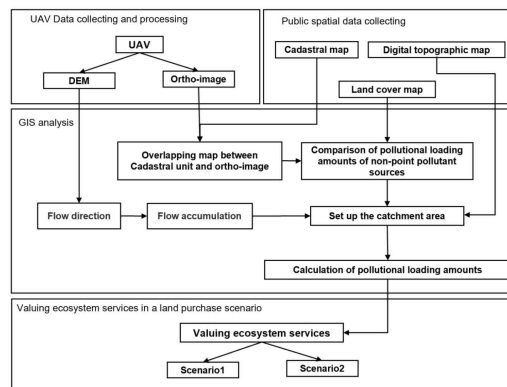


Figure 2. Study flow chart

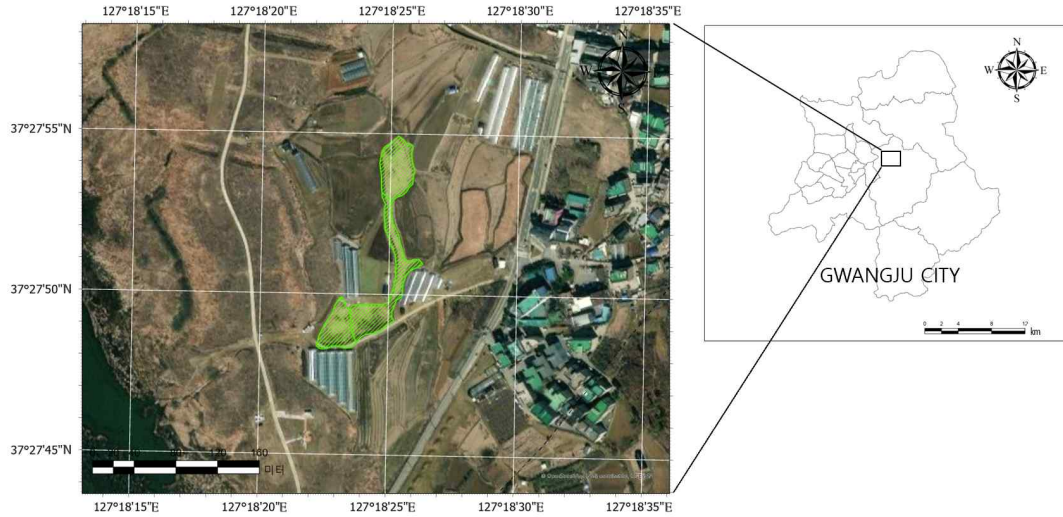


Figure 3. Location of the study area(Purchased land is indicated by a green line)

2. 연구 대상지

본 연구는 경기도 광주시 광동리 일대에 위치한 환경부 매수토지와 그 주변 토지를 대상으로 수행하였다(Figure 3). 이 지역은 완만한 경사로 하천 생태계와 연결되어 있고, 팔당댐으로부터 유하거리 10km 이내에 위치하여 상수원 수질에 영향이 큰 지역이다. 수변생태벨트 조성을 위한 적지로 평가받는 지역으로 중요성과 대표성을 고려하여 연구 대상지로 선정하였다(ME and HGWMC, 2018).

3. 무인항공기 영상 수집 및 처리

촬영에 사용한 기체는 저가의 초소형 무인항공기를 활용하였고 제원은 Table 1.과 같다(Kim et al., 2021; Oh and Kim 2021).

비행 전에 「무인비행장치 측량 작업규정(국토지리정보원 고시 제2020-5670호)」에 따라 영상에서 명확히 구분될 수 있도록 개방되고 평탄한 장소를 선정하여 지상기준점(GCP, ground control point) 6개소와 검사점(CP, control point) 3개소를 설치하였다. Trimble사의 GNSS(R4s GNSS system)를 이용하여 지상기준점과 검사점의 정확한 위치정보를 수집하였다(Table 2).

Table 1. UAV Specification


Image	
Manufacturer	DJI
Dimension	322×91×84 mm (Unfolded)
Weight	907 g
Max. Flight Time	31 min
Max. speed	72 km/h
Max Flight Distance	18 km
GNSS	GPS, GLONASS
Camera Sensor	1" CMOS Effective Pixels: 20 million
Still Image Size	5,472 x 3,648

Table 2. GCP and CP surveying results

Point	X[m]	Y[m]	Z[m]
CP1	541099.0645	226766.6091	30.2040
CP2	541053.5923	226960.9752	29.0590
CP3	540806.4645	226824.5456	29.9448
GCP1	541270.5227	226875.9482	28.4407
GCP2	541072.7709	227107.7043	29.6846
GCP3	540973.6667	226794.0576	30.3335
GCP4	540603.1828	226875.5293	28.9062
GCP5	540868.9662	227074.1994	31.8121
GCP6	541127.8923	227337.8702	32.1357

무인항공기 촬영은 2022년 9월 기상이 양호한 오후 시간에 실시하였고, 기체의 영상 센서 성능과 선행연구 사례를 고려하여 비행고도 70m, 중횡 중복도는 80%로 설정하여 촬영하였다(Do et al, 2018). 촬영된 영상은 스위스 Pix4D Mapper 소프트웨어(ver3.5.7)를 이용하여 정사영상과 DEM으로 제작하였다. Pix4D Mapper는 SIFT, SfM 등 사용자의 편의성, 전문성, 정확성을 높일 수 있는 알고리즘을 기반으로 작동하여 중첩 정확도가 높다고 평가받고 있다(Alidoost and Arefi, 2017).

4. 공간정보 수집 및 분석

연구지역의 1:5,000 수치지형도(2022년 제작)는 국토정보플랫폼(map.ngii.go.kr)에서 취득하였고, 연속지적도(2022년 갱신)는 국가공간정보포털(ngii.go.kr)에서, 세분류토지피복지도(2022년 제작)는 환경공간정보서비스(egis.me.go.kr)에서 각각 취득하였다. 수집된 공간정보 자료는 ArcGIS Pro(Ver. 3.0.3)를 활용하여 분석하였다.

5. 집수구역 설정

집수구역 설정은 다음과 같은 단계로 수행하였다. 첫 번째 단계로 무인항공기로 제작한 DEM을 D8 모델(eight-direction flow model)에 적용하여 강우 유출 경로를 분석하였다(Kim et al., 2022). DEM은 픽셀 단위로 고도 값을 수치로써 지형의 형상을 나타내는데 Figure 4.와 같이 흐름방향도(flow direction)에서는 픽셀 단위로 물의 방향을 의미하는 8개의 숫자값 중 하나를 가진다. 흐름방향에 따른 누적값을 나타내는 흐름누적도(flow accumulation)는 물이 모여 유출되는 경로를 나타낸다(Park et al., 2017).

이와 함께 연구지역의 수치지형도(1:5,000)에서 추출한 표고점(spot elevation points)과 등고선(contour lines)을 이용해 불규칙 삼각망(TIN, triangulated irregular network)을 생성하고 DEM으로 변환하여 동일하게 D8 모델을 적용하였다.

두 번째로 수치지형도에서 도로, 제방, 암거

등 강우 유출에 인위적인 영향을 미친다고 판단되는 요소를 추출하였다. 강우가 발생하면 경사에 의해 자연스럽게 강우 유출수가 지표를 따라 흐르게 되는데 도로 경계선, 우수배수로 등 인공적인 구조물은 그 흐름을 차단하기 때문이다.

세 번째로 토지 높기와 경사 방향을 표현한 레이어를 중첩하였고, 이를 기반으로 디지털화(digitizing)하여 집수구역을 설정하였다. 마지막으로 현장조사를 통해 단계별로 정확성을 검토하여 미지형 집수구역(micro topographical watershed) 범위를 최종 결정하였다.

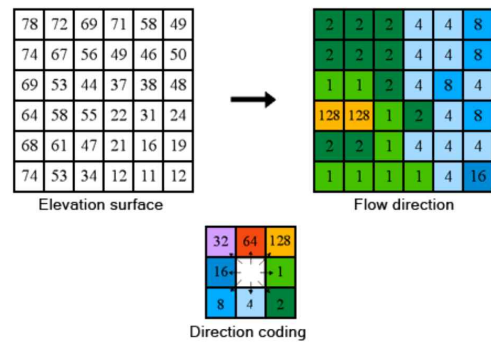


Figure 4. Eight-direction(D8) flow model(Jenson and Domingue, 1988)

6. 오염부하량 산정 및 비교

집수구역 내 토지에서 발생하는 비점오염원 부하량 산정을 위해 「오염총량관리 기본방침」에 따라 지목별로 오염부하량을 계산하였다(수식 1). 국립환경과학원에서는 토지계 배출부하량 산정을 위해 지목별 면적과 연평균 발생부하량단위를 이용하는 방법을 제시하고 있다. 이 방법은 실측 조사를 하지 않고 쉽고 간편하게 배출부하량을 산정할 수 있어 널리 활용되고 있다(NIER, 2019).

토지피복 면적을 적용해 토지계 배출부하량을 산정하는 방법도 토지 이용현황을 반영하기 위한 방법으로 제시되고 있다(Kwon et al., 2016; Park and Lee, 2016). 무인항공기 활용의 장점은 시의성 있는 고해상도 공간 정보 수집이기 때문에 토지이용현황을 반영하고 있는 토지 피복을

Table 3. Pollutonal loading amounts of Units

Cadastral map	Subdivision land cover map(code)	BOD	T-N	T-P
Dry field	Unorganized dry field(222), Facility cultivation(231)	4.38	3.409	1.4
Paddy	Unorganized paddy(212)	4.24	2.92	0.467
Pasture, Park, cemetery	Other cultivation(252), Meadow(423)	3.71	3.986	0.295
Ditch, Pond	Vacant land(623)	0.96	0.759	0.027
Road	Road(154)	12.42	7.553	0.391

이용하는 것이 더 나은 선택이라고 예상하였다. 이를 확인하기 위해 지목과 토지 피복을 각각 적용하여 비교하였다.

$$L_{(land\ category)} = \sum(A \times C) \quad (1)$$

$$L_{(land\ cover)} = \sum(B \times C) \quad (2)$$

$L_{(land\ category)}$ = 지목별 토지계 발생부하량(kg·일)

$L_{(land\ cover)}$ = 토지피복별 토지계 발생부하량(kg·일)

A = 지목별 면적(km²)

B = 토지피복별 면적(km²)

C = 연평균 발생 원단위(kg/km²·일)

토지피복 현황을 고려한 집수구역의 오염부하량을 비교 산정하기 위해 환경부에서 제공하는 세분류 토지피복지도(subdivision land cover map)를 이용하여 토지피복별 면적을 산정하였다. 토지피복에 따른 항목은 Table 3과 같이 대응되는 지목의 오염부하량으로 재분류 하였고, 토지피복별 토지계 발생부하량을 계산(수식 2)하여 앞서 산정한 지목별 토지계 발생부하량과 비교하였다(NIER, 2019; Yu et al., 2020).

7. 시나리오에 따른 오염부하량 저감량 예측

집수구역의 추가 설정 시나리오에 따른 수질 개선 생태계서비스 차이를 정량적으로 비교하기 위해, 상수원관리지역 토지매수 제도의 최소 매수 단위인 100m²를 기준으로 동일한 hexagon 그

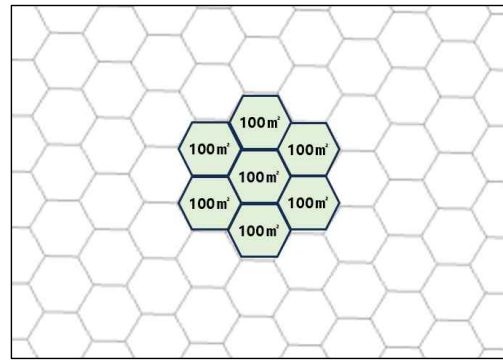


Figure 5. Hexagonal grid divided by 100m²

리드(hexagonal grid)를 생성하였다(Figure 5).

시나리오는 앞서 설정한 집수구역과 연결하면서 흐름누적도에 접촉하는 hexagon을 선택하였을 때 경우와 이와 비교하기 위해 집수구역과 연결하지만 흐름누적도에는 접촉하지 않는 동일 수량의 hexagon으로 선정하였다. 시나리오별로 앞서 제시한 집수구역 설정 방법으로 집수구역 면적과 이에 따른 토지피복별 발생부하량을 비교하였다. 또한 Kim(2023)의 연구에서 제시한 방법으로 수질조절 생태계서비스의 경제적 가치평가를 하였다. 이 방법은 수질오염총량제에서 시행 중인 총량초과부과금 부과방식에 준하여 연간일평균수질조절량과 총량초과부과금 단가 효율, 가격변동지수, 지역별 부과계수를 곱하여 산정하는 방식이다(수식 3).

$$T_{(cost)} = L_{(land\ cover)} \times A \times B \times C \quad (3)$$

$$T_{(cost)} = \text{총량초과부과금(원)}$$

$$L_{(land\ cover)} = \text{토지계 발생부하량(kg·일)}$$

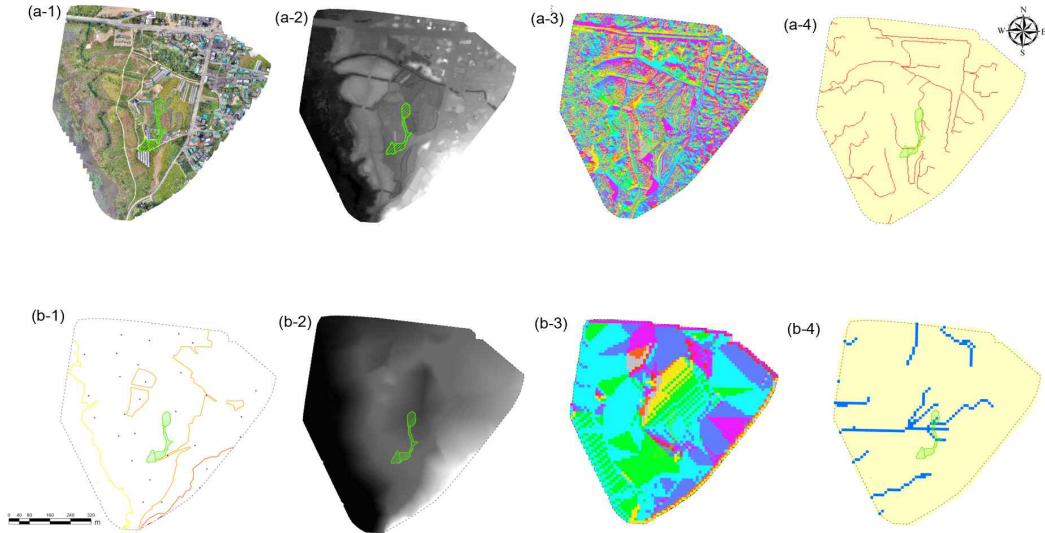


Figure 6. The results of GIS analysis derived UAV data(a) and 1:5,000 digital map(b)

- A = 부과금요율(BOD 5,800원/kg, TP 25,00원/kg)
- B = 2023년도 오염총량초과과징금 가격변동지수 (1.0682)
- C = 지역별 부과계수(1.4)

「수질오염총량관리기본방침」에 따라 오염원은 토지계, 생활계, 축산계, 산업계, 양식계, 매립계로 분류되지만 연구 대상지는 토지계만 해당되기 때문에 토지계 배출 부하량을 이용하였다. 총량초과부과금은 권역별로 목표수질을 정하여 기준을 초과할 때 부과 하고 있는데 본 연구 대상지는 중권역 경안천 지역으로 목표수질은 II 등급에 해당하여 부과계수 1.4를 적용 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 무인항공기 영상 처리 결과

무인항공기로 연구 대상지를 촬영하여 획득한 2,348장 사진으로, 1.62cm의 공간해상도(GSD: ground sample distance)를 가진 정사영상(orthomosaic)과 DEM을 제작하였다(Figure 6. a-1, a-2). 정확도를 평가하기 위해 Table 4.와 같이 검

사점 잔차(residual error)의 평균값으로 정확도를 비교하였을 때, 수평위치 검사점 잔차의 평균이 0.145m, 수직위치는 0.214m로 「무인비행장치 측량 작업규정」의 수치지형도(1/1,000)에서 위치정확도에 대한 허용 범위(수평위치 오차 0.3m, 수직위치 오차 0.3m)에 부합하였다(Kim et al., 2021; Park and Um, 2019).

Table 4. The residual errors of control points

Control points	$\Delta XY[m]$	$\Delta Z[m]$
C1	0.207	0.230
C2	0.072	0.109
C3	0.158	0.304
Average	0.145	0.214

본 연구 결과는 Kim et al.(2021) 연구에서의 수평 위치의 잔차 0.044m, 수직 위치에서 잔차 0.066m에는 미치지 못하였는데 이는 지상기준 점을 설치할 때 위치 선정 등 운용인력의 숙련도에 의한 영향으로 판단된다(Kim et al., 2020; Lee, 2021; Park and Lee, 2016).

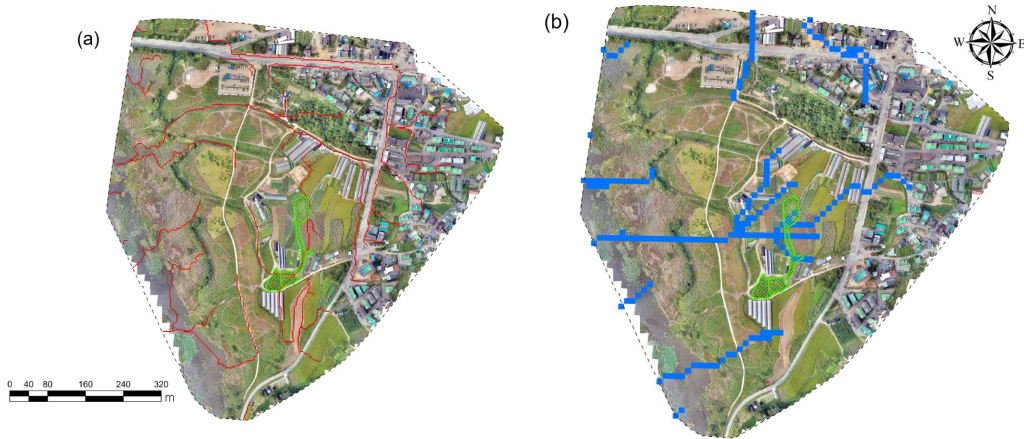


Figure 7. The out-flow way predicted by D8 model using each DEM as a source: (a) UAV data; (b) Spot elevation points and Contour lines(1:5,000)

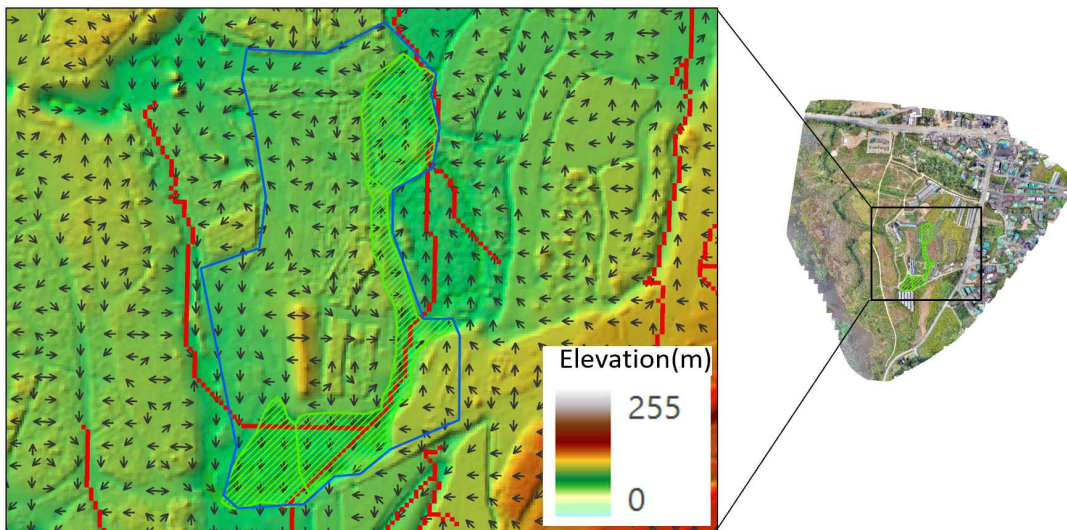



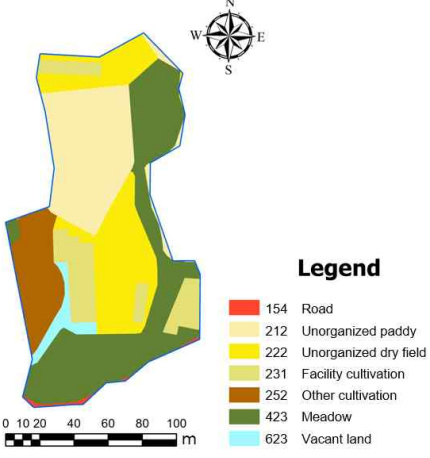
Figure 8. Catchment area(blue line)

2. 흐름누적도 비교 결과

무인항공기 영상 기반 DEM을 활용하여 D8 모델(eight-direction flow model)에 적용하여 Figure 6(a-3)과 같이 흐름방향도(flow direction)를 제작할 수 있었다. 또한, 흐름방향에 따른 누적정도를 나타내는 흐름누적도(flow accumulation)를 통해 Figure 6(a-4)과 같이 유출 경로를 예측하였다. Grau et al.(2021)은 무인항공기 영상 기반 DEM을 활용하여 D8 모델을 통한 저수로와 범람지역

을 비교하였을 때 LiDAR 기반 DEM을 활용하였을 때와 유사한 정확도를 나타낸다고 하였는데 본 연구에서도 흐름누적도에 표현된 유출 경로를 현장조사를 통해 확인하였을 때 구거, 도로, 배수로 등 강우가 유출될 것으로 예상되는 경로와 일치하였다(Figure 7(a)). 무인항공기로 취득한 공간정보는 SfM 등 알고리즘을 통해 지형의 기하학적 구조를 자동으로 재구성하여 대상지 전체에 대해 픽셀 단위로 토지의 높이 값을 가지게 되어

Table 5. Reclassification of Land Cover Code by category of land

Cadastral Map		Subdivision Land Cover Map	
			
Pollutional loading amounts of Units	Category of land (area, ratio)	Pollutional loading amounts of Units	Subdivision Land Cover Code, Name (area, ratio)
Paddy	Paddy (16,232m ² , 100%)	Paddy	212, Unorganized paddy (3,697m ² , 22.8%)
		Dry field	222, Unorganized dry field (3,566m ² , 22.0%)
			231, Facility cultivation (1,794m ² , 11.1%)
		Pasture, Park, Cemetery	252, Other cultivation (1,639m ² , 10.1%)
			423, Meadow (5,063m ² , 31.2%)
		Ditch, Pond	623, Vacant land (438m ² , 2.7%)
Ditch, Pond	Pond (50m ² , 100%)	Pasture, Park, Cemetery	423, Meadow (50m ² , 100%)
		Ditch (119m ² , 100%)	Pasture, Park, Cemetery
	Dry field		231, Facility cultivation (1m ² , 0.8%)
	Road		154, Road (36m ² , 30.3%)

현실의 지형정보에 더욱 근접하게 되기 때문이라고 사료된다(Alphonse et al., 2023).

반면 수치지형도 기반으로 작성한 D8모델의 결과는 강우 유출 예상 경로를 제대로 반영하지 못하는 것으로 확인되었다(Figure 7(b)). 이러한 결과는 연구지역의 면적(489,159m²)에 대비하여 1:5,000 수치지형도에 포함된 공간정보가 표고점 29개, 등고선은 3개에 불과하여 낮은 해상도의 DEM이 생성되었고 이에 따라 지형정보가 더욱 일반화 되어 현실 지형정보를 제대로 반영하지

못하기 때문인 것으로 판단된다(Grau et al., 2021; Thompson et al., 2001).

3. 집수구역 설정 결과

Figure 8.과 같이 환경부 매수토지를 경유하는 유출 경로로 유입되는 범위를 토지 높이, 흐름방향 및 강우유출수 차단 요소 등 공간정보 자료와 현장조사 결과를 고려하여 디지털라이징(digitizing)을 통해 집수구역(16,410m²)을 설정하였다. 대상 지역의 환경부 매수토지는 집수구역 내 주요 유출

경로를 포함하고 있으며, 유출부(pour point)도 말단에 위치하여 비점오염원 관리에 적합한 토지임을 확인할 수 있었다.

4. 토지계 발생부하량 산정 결과

집수구역에 대한 토지계 발생부하량을 산정하기 위해 Table 5.와 같이 지적중첩도(a), 환경부 세분류 토지피복지도(b)를 제작하여 비교하였다. 집수구역의 지목(category of land)은 답, 유지, 구거로 구분되며, 각 지목을 세분류 토지피복으로 재분류하였을 때 토지 이용 변화를 확인할 수 있었다. 본 연구에 활용한 환경부의 세분류 토지피복지도는 2021년 항공사진을 기반으로 2022년에 제작된 자료이다. 『공간정보관리법』에서 지목은 토지의 주된 용도에 따라 토지의 종류를 28가지로 구분하여 지적공부에 등록한 것을 말하며 필지마다 주된 용도에 따라 하나의 지목으로 설정된다. 또한 일시적인 용도에 대해서는 지목 변경을 하지 않아도 되며, 지목변경을 위해서는 관련 법에 맞게 행정처리가 수반되어야 하기 때문에 토지 이용 현황을 제때 반영하지 못한다. 이에 비해 환경부 세분류 토지피복 지도는 필지와 상관없이 토지 피복 현황에 따라 41개 항목으로 구분되어 정확하고 객관적인 토지 이용현황을 반영한다. 특히 환경부에서는 2020년에 전국의 세분류 토지피복 지도를 완성한 이후, 인공지능 기술을 통해 토지 피복지도의 갱신 주기를 단축할 예정이기 때문에 활용성이 더욱 증가할 것이다(Kim et al., 2021; Lee et al., 2022).

Table 6. Calculation of the non-point pollution load amount (kg/km²·day)

Division	Cadastral map(a)	Land Cover map(b)	Difference values (b-a)
BOD	0.069	0.067	(0.002)
T-P	0.008	0.013	0.005

집수구역의 토지계 오염부하량 산출 결과는

Table 6.과 같다. BOD는 지목별 면적 적용 시 0.069kg/km²·day, 환경부 토지피복지도 면적 적용 시 0.067kg/km²·day를 나타내었다. T-P에서는 각각 0.008kg/km²·day, 0.013kg/km²·day을 나타내었다. 이러한 차이는 집수구역의 토지 이용이 기존 경작지에서 밭 경작지로 빠르게 변하고 있는 토지 이용현황을 지목이 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. Park and Lee(2016)는 토지 피복지도로 산정한 토지계 발생부하량과 지적도로 산정한 발생부하량이 유사하다고 보고하였으며, Yu et al.(2020)은 토지계 비점오염원 부하량 산정을 위해서는 지적도가 아닌 세분류 토지피복지도를 이용하는 것이 정확한 발생부하량 산정에 적합하다고 하였다. 토지 이용현황을 고려하여 오염부하량을 산정하는 것은 비점오염원 저감을 위한 수변녹지 설계 기준으로 활용할 수 있다(Kwon et al., 2019). 특히 Jeon et al.(2018)은 지역별로 비점오염원 유출 특성 조사, 처리기술 개발, 비용, 운영 및 관리 평가 등을 전반적으로 검토하여 지역 맞춤형 대책 수립에 대한 연구가 필요하다고 하였고, 이러한 지역 특성을 반영하기 위해서는 현재의 토지이용 현황을 반영하는 토지피복지도를 활용하여 오염부하량을 산정하는 것이 합리적인 방안이 될 것이다. 더욱이 현재 토지 이용현황과 지형정보를 가지는 무인항공기 영상 기반 공간자료를 함께 적용하는 것은 정확성을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단하였다. 매수토지는 전답, 대지, 임야 등 다양한 조건을 가지는데 본 연구는 경사가 완만한 경기도 광주시 광동리 일원 경작지역에 대해 실시하였기 때문에 비탈면, 계곡 등 급경사 지역이거나 산림의 수관으로 인해 DTM 생성이 어려운 지역에 대해 일반화하여 적용하기 어렵다. 하지만 매수된 토지 중에서 강우 유출수가 유입 가능한 토지는 경사가 완만한 경작지로 사용되었던 토지 또는 식생이 훼손된 나대지인 경우가 많아 수변녹지 설계 단계에서 본 연구에서 제안한 방법을 적용하는 것이 가능할 것이다.

5. 시나리오에 따른 오염부하량 저감량 예측결과

토지매수 시나리오에 따른 수질개선 생태계서비스 차이를 정량적으로 비교하기 위해, 앞서 설정한 집수구역과 연결하면서 흐름누적도에 접촉하는 헥사곤(100㎡) 15개를 선택하여 시나리오 1로 설정하였다. 시나리오 2는 집수구역과 연결하지만 흐름누적도에는 접촉하지 않는 동일한 수의 헥사곤을 설정하였다(Figure 9).

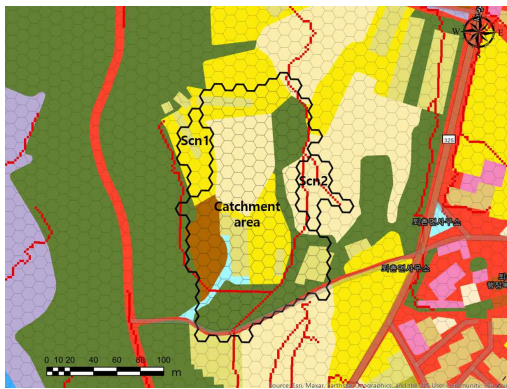


Figure 9. Location feature designation in Scenarios 1 and 2

시나리오 1에 따라 토지를 매수하였을 때 헥사곤(100㎡)은 15개로 면적은 1,500㎡에 해당한다. 2023년도 개별공시지가(49,400원/㎡) 기준으로 토지를 매수할 때 필요한 매수 금액은 74,100,000원으로 산출되었다. 시나리오 2에 따라 토지를 매수할 때 면적과 매수에 필요한 금액도 동일하며, 흐름누적도에 접촉 유무만 차이가 났다(Table 7).

이러한 차이는 매수 시나리오에 따라 추가되는 집수구역에 영향을 미쳤다. 시나리오1에 따라 매수하게 되었을 때 추가되는 집수구역은 매수되는 토지인 15개의 헥사곤에 불과하여 총 215개 헥사곤의 21,500㎡로 집수구역이 설정되었다. 시나리오2에 따라 매수하게 되면 매수되는 토지 15개 헥사곤에 더하여 110개의 헥사곤이 집수구역으로 추가 되어 총 335개 헥사곤 33,500㎡의 집수구역이 추가되는 것으로 나타났다. 집수 구

Table 7. Scenarios with and without Hexagon intersected Flow Accumulation

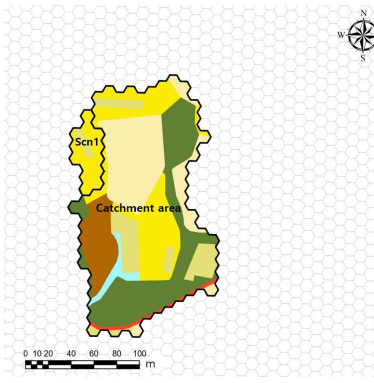
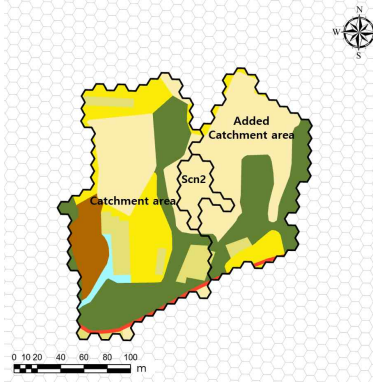
Category	Scenario 1	Scenario 2
The total number of Hexagon	15	15
The number of Hexagon intersected Flow Accumulation	0	15
Total area(㎡)	1,500	1,500
Individual official land price in 2023(won/㎡)	49,400	49,400
Total Individual official land price in 2023((KRW)	74,100,000	74,100,000

역의 면적에 따라 오염부하량도 차이가 발생하였다. 시나리오1은 BOD는 0.09kg/㎢·day, T-P는 0.018kg/㎢·day, 시나리오2는 BOD는 0.13kg/㎢·day, T-P는 0.022kg/㎢·day로 나타났다. 매수된 토지를 활용한 비점오염원 저감형 수변녹지로 조성하여 집수구역 내 오염부하량을 저감한다고 하였을 때 수질개선 생태계서비스의 경제적 가치평가 결과, 시나리오1에 따라 구획되는 집수구역 면적에 대해 BOD, T-P 저감에 따라 연간 530,566원이 경제적 가치로 산출되었다. 시나리오2는 연간 711,789원의 가치가 있는 것으로 산출되어 동일한 금액으로 토지를 매수하여도 매수하는 토지의 위치에 따라 수질개선의 효과가 다르다는 사실을 정량적으로 비교할 수 있었다(Table 8).

IV. 결 론

본 연구에서는 상수원 수질개선을 목적으로 매수된 토지에 대해 주변 비점오염원을 유입하여 처리 가능한 집수구역을 설정하고, 토지 이용 현황을 반영하여 오염부하량을 산정하고자 하였다. 이를 위해 무인항공기 영상 기반 공간정보를 활용하여, 보다 신뢰성 있는 비점오염 배출량 산정 방안을 제시하였다. 아울러 매수 시나리오에 따라 집수구역 면적이 차이가 발생하고 이에 따

Table 8. The result of Ecosystem Water Quality Regulating Services by Scenarios

Category	Scenario 1	Scenario 2	
Hexagon model map			
The number of Added Hexagon by Scenario	15	135	
The total number of Hexagon by Scenario	215	335	
Total area(m ²)	21,500	33,500	
Calculation of the non-point pollution load amount (kg/km ² ·day)	BOD	0.09	0.13
	T-P	0.018	0.022
The economic value of water quality regulation in total watershed(KRW/yr)	530,566	711,789	

라 수질개선 생태계서비스에도 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다. 수질정화 습지, 수질정화림 등 비점오염원 저감 대상지 선정을 위해 시나리오별 저감량을 제시한 연구는 있지만(Im et al., 2021; Lee et al., 2019), 이미 매수된 환경부 토지와 확장 시나리오에 대해 무인항공기 영상 기반 공간정보를 활용하여 수질개선 생태계서비스의 가치를 산출한 연구로써 의의가 있다. 다만, 본 연구에서 제시한 가치평가 방법은 총량 초과부과금 부과방식에 준하여 수질개선에 대한 가치를 산정한 연구사례에서 제시한 산식을 가정하여 대입하였기 때문에 향후 다양한 평가 방법을 적용하여 비교한다면 더욱 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다.

아울러, 본 연구에서 생태계서비스 가치평가와 관련하여 수질개선 부분에 초점을 두었지만, 지속

가능한 상수원관리지역 관리를 위해서는 수질개선 뿐만 아니라 탄소흡수원 증진, 문화서비스 확산 등의 고려가 필요하다. 향후 상수원관리지역 규모를 대상으로 생태계서비스의 동반상승(synergies) 또는 상충관계(trade-offs)와 관련된 역동적인 상호작용을 규명하는 추가 연구가 이루어 진다면 토지 매수 및 수변녹지 조성에 있어 생태계서비스 증진을 위한 과학적인 의사결정 도구로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

Reference

- Ahn S. E., W. Y. Joo, Y. J. Shin, J. Jang, H. S. Kwon, C. K. Kim, H. N. Kim, A. R. Seol, H. L. Lee, W. I. Choi, and H. Y. Heo, (2020) Development of Korea national

- ecosystem assessment framework to support decision making. *Journal of environmental policy and administration*. 28(2): 101-129.
- Ahmed, R. and Mahmud, K. H., 2022. Potentiality of high-resolution topographic survey using unmanned aerial vehicle in Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 26: 100729.
- Alidoost, F. and Arefi, H., 2017. COMPARISON OF UAS-BASED PHOTOGRAMMETRY SOFTWARE FOR 3D POINT CLOUD GENERATION: A SURVEY OVER A HISTORICAL SITE. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. IV-4/W4: 55-61.
- Alphonse, A. B., T. Wawrzyniak, M. Osuch, N. Hanselmann. 2023. Applying UAV-Based Remote Sensing Observation Products in High Arctic Catchments in SW Spitsbergen. *Remote Sensing*. 15(4): 934.
- Cole, L. J., J. Stockan, and R. Helliwell, 2020. Managing Riparian Buffer Strips to Optimise Ecosystem Services: A Review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 296: 106891.
- EPA, 2019. Guidelines for Application of Non-Point Pollution Reduction Techniques in Han River Water System
- Fitzgibbon, A. and Zisserman, A., 1998. Automatic 3D model acquisition and generation of new images from video sequences. 9th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 1998), Rhodes, Greece. 1-8.
- Grau, J., K. Liang, J. Ogilvie, P. Arp, S. Li, B. Robertson and F.-R. Meng, 2021. Improved Accuracy of Riparian Zone Mapping Using Near Ground Unmanned Aerial Vehicle and Photogrammetry Method. *Remote Sense*. 13(10): 1997.
- Hanna, D.E.L., C. Raudsepp-Hearne, and E. M. Bennett., 2020. Effects of land use, cover, and protection on stream and riparian ecosystem services and biodiversity. 34(1): 244-255.
- Im, J. Y., C. W. Kang, K. S. Gil, 2021. Applicability on Wet-land for Management of NPS in Organic Matter and Nutrients from Agriculture and Livestock Farm Area . *Journal of Wetlands Research*, 23(4): 372-380.
- Jeon, J. C., J. Y. Jung, Y. S. Kim and L. H. Kim, 2018. A Review of Research Trend Related to NPS and Suggestion for Research Direction in the Future. *Journal of Wetlands Research*. 20(1): 80-93
- Jo, H. K. and T. W. Ahn, 2014. Application of natural forest structures to riparian greenways, *Paddy Water Environ*. 12(1): 99-111.
- Jung, P. M., J. I. Kim, I. A. Yeo, W. Y. Joo, and K. E. Lee,(2021) The selection of measurement Indicators by spatial levels for ecosystem services sssessmen. *J. Korean Env. Res. Tech*. 24(6): 67-68.
- Kim J. S., 2018. Calculating Erosion Amount of Sea-cliff in Dundu-ri by Using UAV. *Jornal of Photo Geography*. 28(2): 1-12.
- Kim, D. P., K. S. Back and S. B. Kim, 2021. Production and Accuracy Analysis of Topographic Status Map Using Drone Images. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. 22(2): 35-39.
- Kim, J., Y. H. Song, W. K. LEE, 2021. Accuracy analysis of Multi-series Phenological Land-cover Classification Using U-Net-based Deep Learning Model, Focusing on the Seoul, Republic of Korea. *Korean Journal of Remote Sensing*. 37(3): 409-418.
- Kim, G. W., 2023. Research on Trend Analysis of Ecosystem Water Quality Regulating Services in National Park. *J. Environ. Impact*

- Assess. 32(2): 72~82.
- Kim, K. L. and Ryu, J. H., 2020. Generation of Large-scale Map of Surface Sedimentary Facies in Intertidal Zone by Using UAV Data and Object-based Image Analysis (OBIA). *Special Issue on Coastal Remote Sensing*. 36(2): 277-292.
- Kim, N. K., M. S. Park, M. J. Jeong, D. H. Hwang, H. J. Yoon, 2021, A Study on Field Compost Detection by Using Unmanned Aerial Vehicle Image and Semantic Segmentation Technique based Deep Learning. *Korean Journal of Remote Sensing*. 37(3): 367-378.
- Kim, T. W., H. S. Yoo, S. I. Park, J. H. Kim, 2022. Slope Stability in Logging Areas Using Unmanned Aerial Vehicle Imaging. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 38(7): 39-47.
- Kwon, H. G., K. H. Kim, S. M. Na, H. J. Yoon, D. S. Shin, T. H. Im, 2016. Analysis of Nonpoint Source Pollutant Load according to the Land Cover Classification System. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*. 16(6): 411-419.
- Kwon, H. G., T. H. Im, D. S. Shin, C. S. Lee, 2018. Analysis of Nonpoint Source Pollution and Calculation of Load Per Unit Area in Transportation Area in Nakdong River Basin. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 18(3): 351-362.
- Lee, C. H., Y. B. Seong, J. Weber, G. Yadamsuren. 2021. UAV-derived DEM Reveals the Original Geometric Dimension of Tabun-Khara Impact Crater in Mongolia. *Journal of the Korean Geographical Society*. 56(6): 705-716.
- Lee, D. H., S. H. Kil, S. B. Lee, 2021. A Study on Obtaining Tree Data from Green Spaces in Parks Using Unmanned Aerial Vehicle Images: Focusing on Mureung Park in Chuncheon. *Journal of People, Plants, and Environment*. 24(4): 441-450.
- Lee, D. S., K. B. Lim, S. E. Hong, 2022. CNN(Convolutional Neural Network), Land Use Status, Image-based Land Use Status Survey, Automation of survey, Reclassification of survey items system. *Journal of the Korean Society of Cadastre*. 38(1): 1-15.
- Lee, J. P., 2021. Quality Assessment of Digital Surface Model Vertical Position Accuracies by Ground Control Point Location. *Journal of Cadastre & Land InformatiX*. 51(1): 125-136.
- Lee, S. H., J. M. Kim, H. S. Shin, S. C. Kwon, 2019. Evaluation of Riparian Buffer for the Reduction Efficiency of Non-point Sources Using HSPF Model. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*. 19(1): 341-349.
- Li, X., X. Yu, K. Wu, Z. Feng, Y. Liu and X. Li, 2021. Land-use zoning management to protecting the Regional Key Ecosystem Services: A case study in the city belt along the Chaobai River, China, *Science of The Total Environment*. 762: 143167.
- Librán-Embí, F. F. Klaus, T. Tschardtke, I. Grass, 2020. Unmanned aerial vehicles for biodiversity-friendly agricultural landscapes - A systematic review. *Science of The Total Environment*. 732: 139204
- Lowe, D. G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece*. 2: 1150-1157.
- Meinen, B. U. and D. T. Robinson, 2020. Streambank topography: an accuracy assessment of UAV-

- based and traditional 3D reconstructions, *International Journal of Remote Sensing*, 41(1): 1-18.
- ME and HGWMC. 2018. The 3rd Management plan('18~'23) of Hna-gang riparian basin. Research report to Hangang watershed management committee.
- ME and HGWMC. 2024. The 4rd Management plan('24~'28) of Hna-gang riparian basin. Hangang watershed management committee.
- ME, MOLIT, MAFRA, MOTIE, KFS, RDA, 2020. A Comprehensive Plan for Rainfall Non-Point Pollution Source Management.
- Ministry of Environment. 2022. Basic Policy for the Management of Pollutant Loading Allocation.
- NIER, 2019. Technical Guidelines for Total Water Pollution Load Management System.
- Oh, S. H. and Kim, M. Jo., 2021. Applicability Review of Street Dimensional Data Survey Using Point Clouds Generated from Drone Photogrammetry. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 39(6) 401-408.
- Park, J. H., and Lee, W. H., 2016. Orthophoto and DEM Generation in Small Slope Areas Using Low Specification UAV. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 34(3): 283-290.
- Park, J. H., J. C. Ryu, D. S. Shin, J. K. Lee, 2019. The Effective Approach for Non-Point Source Management. *Journal of Wetlands Research*, 21(2): 140-146.
- Park, J. K. and Um, D. Y., 2019. Evaluation of Accuracy and Utilization of the Drone Photogrammetry for Open-Pit Mine Monitoring. *Journal of Digital Convergence*, 17(12): 191-96.
- Park, K. O., and Lee, C. H. 2016. Land Generated Waste Load Unit Estimation Based on Land Use Map with LP Optimization. *Journal of Wetlands Research*, 18(3) 226-231.
- Park, Y. G., K. H. Kim and J. H. Yoo, 2017. GIS Based Development of Module and Algorithm for Automatic Catchment Delineation Using Korean Reach File. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 20(4): 126-38.
- Park, Y. S., C. K. Kim and W. S. Lee, 2021. A study of useability of ecosystem service assessment on strategic environmental assessment. *J. Korean Env. Res.Tech*, 24(2): 115-126.
- Song, W. K., 2019. Application of UAV for Vegetation Monitoring in Urban Green Space. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 22(1): 61-72.
- Thompson, J.A., J.C. Bell, C.A. Butler, 2001. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma*, 100, 67-89.
- Xu, Z., X. Shen, L. Cao, N. C. Coops, T. R.H. Goodbody, T. Zhong, W. Zhao, Q. Sun, S. Ba, Z. Zhang, X. Wu, 2020. Tree species classification using UAS-based digital aerial photogrammetry point clouds and multispectral imageries in subtropical natural forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92: 102173.
- Yi, H. C. 2022, Ecosystem Services Valuation and Research Methodology for Mapping Ecosystem Services: Concepts, Trends, Issues, and Applications. *Journal of the Korean Geographical Society*, 57(2): 189-208.
- Yu, J. E., Y. J. Kim, H. C. Sung, K. I. Lee, J.

Y. Choi and S. W. Jeon, 2020. Method for Calculating the Pollution Load Amount of Agricultural Non-Point Sources Using Land Cover Map. *Journal of Environmental Science International*. 29(12): 1249-1260.