Ecology and Resilient Infrastructure (2023) 10(4): 135-142
https://doi.org/10.17820/eri.2023.10.4.135

http://www.kseie.or.kr/
Online ISSN: 2288-8527

ORIGINAL ARTICLE

금강에서 다분광 위성영상을 이용한 보 운영에 따른 모래톱 형성 추적 방법의 개발

Development of a Method for Tracking Sandbar Formation by Weir-Gate Opening Using Multispectral Satellite Imagery in the Geumgang River, South Korea

이철호[1] · 조강현[2*]

[1]인하대학교 바이오시스템융합학부 박사과정, [2]인하대학교 생명과학과 교수

Cheolho Lee[1] and Kang-Hyun Cho[2*]

[1]Doctor Course, Department Biological Sciences and Bioengineering, Inha University, Incheon 22212, Korea
[2]Professor, Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea

Received 12 December 2023, revised 14 December 2023, accepted 14 December 2023, published online 31 December 2023

ABSTRACT: A various technology of remote sensing and image analysis are applied to study landscape changes and their influencing factors in stream corridors. We developed a method to detect landscape changes over time by calculating the optical index using multispectral images taken from satellites at various time points, calculating the threshold to delineate the boundaries of water bodies, and creating binarized maps into land and water areas. This method was applied to the upstream reach of the weirs in the Geumgang River to track changes in the sandbar formed by the opening of the weir gate. First, we collected multispectral images with a resolution of 10 m × 10 m taken from the Sentinel-2 satellite at various times before and after the opening of the dam in the Geumgang River. The normalized difference water index (NDWI) was calculated using the green light and near-infrared bands from the collected images. The Otsu's threshold of NDWI calculated to delineate the boundary of the water body ranged from -0.0573 to 0.1367. The boundary of the water area determined by remote sensing matched the boundary in the actual image. A map binarized into water and land areas was created using NDWI and the Otsu's threshold. According to these results of the developed method, it was estimated that a total of 379.7 ha of new sandbar was formed by opening the three weir floodgates from 2017 to 2021 in the longitudinal range from Baekje Weir to Daecheong Dam on the Geumgang River. The landscape detection method developed in this study is evaluated as a useful method that can obtain objective results with few resources over a wide spatial and temporal range.

KEYWORDS: Binarization, Normalized difference water index (NDWI), Otsu's threshold, Remote sensing, Sentinel-2

요 약: 하천 생태계에서 경관의 변화와 그 영향요인을 연구하기 위해 다양한 원격 탐지 및 영상 분석이 활용된다. 본 연구에서는 다양한 시점에서 위성에서 촬영된 다분광 영상으로 광학 지수를 계산하고, 수역의 경계를 획정하는 임계치를 계산하여 육역과 수역으로 이진화한 지도를 작성하여 시간에 따른 경관 변화를 탐지하는 방법을 개발하였다. 그리고 이 방법을 금강에 적용하여 보 수문 개방에 의하여 형성된 모래톱의 변화를 추적하였다. 먼저 금강에서 보 개방 전후의 다양한 시점에서 Sentinel-2 위성에서 촬영된 10 m × 10 m 해상도의 다분광 영상을 수집하였다. 수집된 영상에서 녹색광과 근적외선 대역으로 정규수분지수 (normalized difference water index, NDWI)를 계산하였다. 수역의 경계를 결정하기 위하여 산출한 NDWI의 Otsu 임계값은 −0.0573부터 0.1367의 범위이었다. 원격탐사에 의하여 결정된 수역의 경계는 실제 영상에서의 경계와 일치하였다. 이 NDWI에 의하여 수역과

***Corresponding author:** khcho@inha.ac.kr, ORCID 0000-0003-4546-3546

ⓒ Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.
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.

육역으로 이진화된 지도를 작성하였다. 이 결과에 따르면 금강의 백제보부터 대청댐까지 종적 범위에서 2017년부터 2021년까지 수행된 3개의 보 수문 개방에 의해 총 379.7 ha의 새로운 모래톱의 서식처가 형성된 것으로 추정되었다. 본 연구에서 제안하는 경관 탐지 방법은 넓은 시공간 범위에서 적은 자원으로도 객관적인 결과를 얻을 수 있는 방법으로 평가된다.

핵심어: 이진화, 정규수분지수, Otsu 임계값, 원격탐사, Setinel-2

1. 서 론

하천의 경관은 홍수와 같은 자연적 교란이나 하천 시설물의 건설, 운영과 같은 인위적 관리와 같은 일련의 사건으로 변한다. 이러한 사건에 의한 경관의 변화를 추적하고 그 변화 요인을 밝히는 것은 하천 생태계의 건강성 유지와 관리에 있어 기본이 된다 (Gurnell et al. 2016). 하천 경관에 대한 연구는 넓은 시공간 범위를 가지므로 원격 탐지 및 영상 분석 방법을 널리 활용한다. 좁게는 카메라와 드론, 넓게는 항공 영상과 위성 영상을 활용하여 가시광선, 근적외선 대역 등 다양한 스펙트럼의 자료를 수집하여 이를 지형, 서식처, 식생 등을 유형화하고 지도화 하는데 이용하고 있다 (Marcus and Fonstad 2010, Tomsett and Leyland 2019, Piégay et al. 2020).

국내에서는 4대강 살리기 사업을 포함한 광범위한 하천정비로 인해 하천 경관이 급격히 변화하였고, 하천의 경관 변화에 대하여 다양한 연구가 수행되고 있다. 특히 금강에서는 4대강 사업에 의하여 2012년에 백제보, 공주보, 세종보의 3개 대규모 다기능 보가 건설되었다. 그 후 하천의 수질 및 생태계 복원을 목적으로 2017년부터 금강 3개 보의 수문 개방이 이루어졌기 때문에 이로 인한 경관 변화를 추적하기 위하여 원격 탐사를 활용한 연구가 수행되었다 (Ock et al. 2020, Kim et al. 2021, Yoon et al. 2021, Lee et al. 2022). 이들 연구는 금강에서 보 건설 전과 후, 그리고 보의 개방 전과 후의 시간적 범위와 보를 기준으로 상, 하류로 10 km 이하의 공간 범위의 제한된 규모에서 수행되었다. 또한 이들 연구에서는 드론을 이용하여 하천 경관을 직접 촬영하거나 항공 영상을 수집하여, 이를 연구 목적에 따라 경관을 유형화하고 지도화 하였다. 지도화 과정은 연구자가 직관적으로 유형을 판단하며 인력으로 영상물 위에 지도를 직접 작도하여 이루어진다. 이러한 연구 방법은 높은 해상도의 영상과 지도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 하나의 영상물에서 유형을 분류하고 지도를 작도할 때, 많은 인력과 시간이 소요된다. 때문에 공간적, 시간적 연구의 확장이 힘들고 유형 분류에 있어 연구자의 주관이 개입될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 다분광 위성영상에서 광학지수를 계산하고 통계적으로 분류하는 방법을 제안하고자 한다. 이 같은 방법은 보다 적은 자원으로 짧은 시점, 넓은 공간의 자료를 얻기 쉬우며 객관성을 확보할 수 있다. 그리고 개발된 방법을 보 운영에 따라서 모래톱의 지형 변화가 나타난 금강에 적용하여 검증하였다. 금강 3개의 보의 영향을 받는 구간에서 보의 수문 개방에 따라 인공위성 영상 자료를 수집하고 원격탐사에 의하여 수역의 경계를 획정 (delineation)하여 보 개방에 따른 모래톱의 형성을 추적하였다. 또 그 결과를 감독 분류한 지도와 비교하여 본 연구에서 제안하는 탐지 방법을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 조사지 개황

본 연구의 대상지는 금강의 4대강 보 설치 구간이다. 한반도의 중남부에 위치하는 금강은 유로연장은 398 km, 유역면적은 9,913 km^2이다. 금강에서 연구 대상 구간은 대청댐 하류에 위치하며, 대청댐 및 세종보, 공주보, 백제보에 의해 수위가 관리되고 있다 (MOLIT 2023). 본 연구는 금강에서 백제보부터 대청댐까지 보를 기준으로 3개의 구간으로 구분하여 수행되었다 (Fig. 1). 1) 백제보 구간은 금강 하굿둑으로부터 57 km 상류에 위치한 백제보로부터 공주보까지 23 km의 종적 범위이다. 2) 공주보 구간은 공주보부터 세종보까지 18 km의 종적 범위이다. 3) 세종보 구간은 세종보부터 대청댐까지 34 km의 종적 범위이다.

금강에서는 2017년 하반기부터 세종보를 시작으로 수문을 개방하여 수위가 감소하였다 (Fig. 2). (a) 백제보는 2017년부터 2019년까지 단기적으로 완전 개방을 실시하였다. 2020년 5월에 EL. 1.5 m로 완전 개방이 되었고 10월에 EL. 2.8 m로 폐쇄 후 2021년 3월에 다시 완전 개방하였다. 따라서 본 연구에서는 2020년 5월에

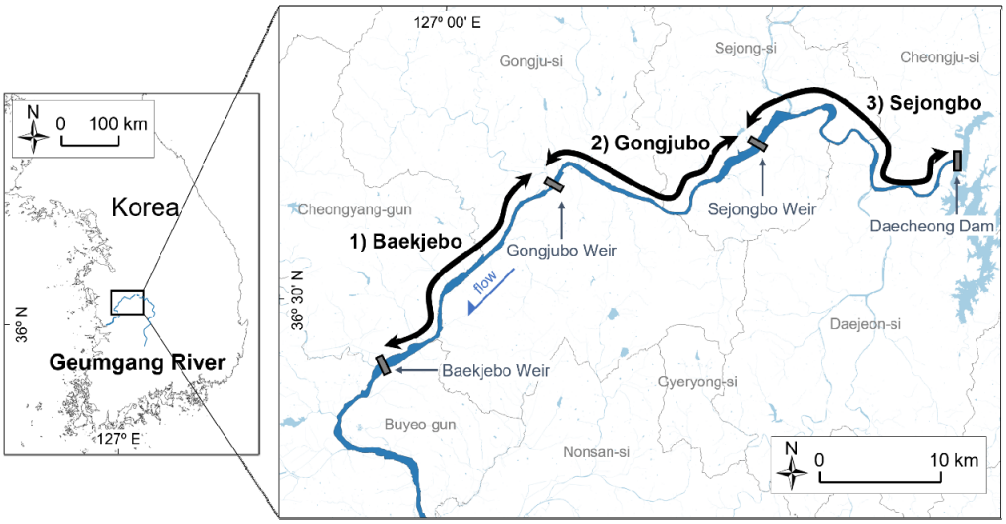

Fig. 1. Map showing the study site in Geumgang River, South Korea. The black double arrow indicates three study sections for this study.

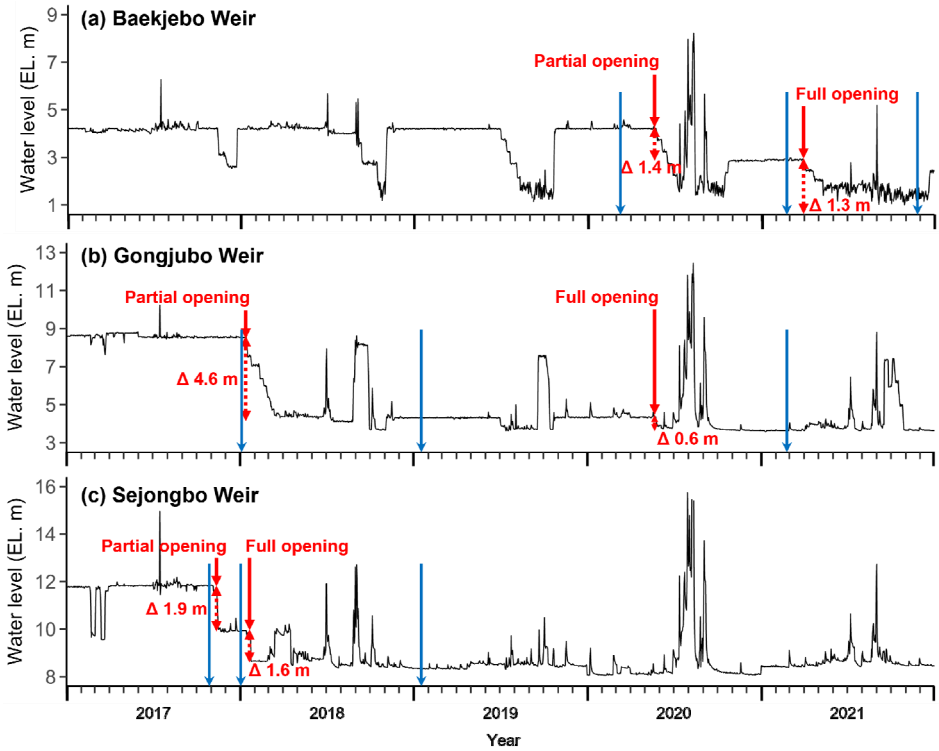

Fig. 2. Water level changes from 2017 to 2022 at the water level observation stations of the Geumgang River, South Korea. Blue arrow indicates when multispectral satellite imagery was collected for each section.

부분 개방, 2021년 3월에 완전 개방을 실시한 것으로 가정하였다. (b) 공주보는 2018년 1월에 EL. 4.3 m로 부분 개방하였고 지역 축제를 위해 단기적으로 수문을 폐쇄하기도 했지만 대체로 이 수위를 유지하였다. 그리고 2020년 5월부터 완전 개방하여 수위를 EL. 3.7 m로 유지하였다. (c) 세종보는 2017년 11월에 수문을 부분 개방하여 수위를 EL. 10.0 m로, 2018년 1월부터 수문을 완전 개방하여 EL. 8.4 m의 수위를 유지하였다.

2.2 자료 수집과 분석

보 수문 개방으로 형성된 모래톱의 면적을 추정하기 위해 각 보의 수문 개폐 시점에서 Sentinel-2 위성에서 촬영된 10 m × 10 m 해상도의 다분광 영상을 6 시점 (2017년 10월 30일, 2018년 1월 3일, 2019년 1월 13일, 2020년 3월 8일, 2021년 2월 21일, 2021년 11월 28일)에서 수집하였다 (Fig. 2). 수집된 영상을 분석하는 과정은 QGIS (ver. 3.32.0; QGIS.org 2023)와 R (ver. 4.3.2; R Core Team 2023)을 이용하여 수행하였다 (Fig. 3). 먼저 1) 수집된 영상에서 녹색광과 근적외선 대역으로 정규수분지수 (normalized difference water index, NDWI)를 계산했다 (Gao 1996). 2) 각 시점의 정규수분지수에서 'EBImage' 패키지의 'otsu' 함수를 통해 Otsu의 임계값을 계산하였다 (Otsu 1979, Pau et al. 2010). 3) 각 격자의 정규수분지수가 Otsu의 임계값 보다 큰 값을 가지면 수역으로, 이보다 작은 값을 가지면 육상으로 판단하여 이진화한 영상으로 변환하였다. 4) 보의 수문 개방 전 이진화 영상과 부분 개방 후 이진화 영상을 교차 분석하여, 보의 수문 개방 전 이진화 영상에서는 수역이었는데 부분 개방 후 이진화 영상에서 육상이라면 해당 격자는 부분 개방으로 형성된 것으로 판단하였다. 5) 계속해서 부분 개방 후에도 여전히 수역이었지만 완전 개방 후의 이진화 영상에서 육상으로 판단되었다면 해당 격자는 완전 개방으로 형성된 것으로 판단하였다.

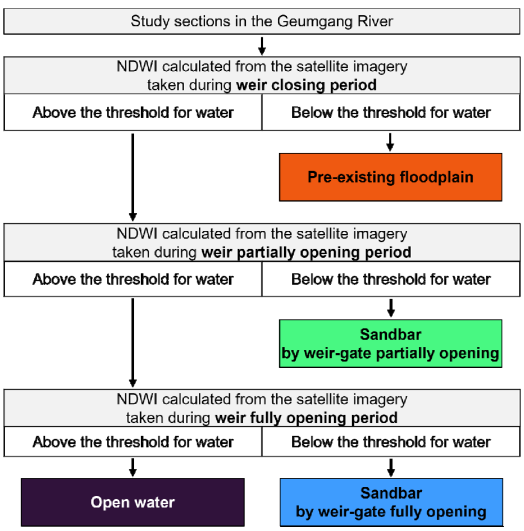

Fig. 3. Flowchart for distinguishing riparian habitat with the different formation time using multispectral satellite images (NDWI = normalized difference water index, threshold = Otsu's threshold value).

2.3 결과 검증 및 비교

본 연구에서 개발한 다분광 위성 영상 분석 방법을 평가하기 위해 감독 분류 방법으로 그려진 지도와 교차 검증하였다. 각 구간에서 사용된 위성사진들을 비교하여 각 보의 직상류 3 km까지 보의 수문 개방으로 새롭게 형성된 모래톱과 그 외 유형 (수역 및 기존 홍수터) 지도를 그렸다. 그리고 둘을 중첩하여 모래톱에 대한 민감도와 특이도를 계산하였고 전체 지도의 일치율을 정확도로 계산하였다.

추가적으로 기존 문헌에서 보고한 보의 수문 개방으로 형성된 모래톱의 면적과 본 연구 방법으로 추정된 모래톱의 면적을 비교하였다. 따라서 금강에서 수행된 보 운영에 따른 경관 변동에 대한 기존 연구 결과를 수집하였다. 각각의 자료에서 연구 구간이 상이하므로, 이들 자료의 공간 범위를 본 연구의 공간 범위와 일치시켜서 모래톱의 면적을 비교하여 오차율을 계산하였다.

본 연구에서 이용한 문헌의 결과를 살펴보면, 1) Ock et al. (2020)은 세종보 상, 하류의 5 km의 종적 범위에서 수문 개방 전 (2017년), 후 (2018년)에 항공영상을 수집하여 서식처 유형을 감독분류 하였다. 이 결과를 본 연구의 연구 구간으로 나누어 보면 세종보 개방으로 공주보 구간에서 11.8 ha, 세종보 구간에서 19.8 ha의 육상 서식처가 증가하였다. 2) Kim et al. (2021)에서는 세종보와 공주보의 직상류로 약 3 km의 종적 범위와 세종보 상류의 대조구간 범위에서 대청댐 건설 전 (1966년)부터 이들 보의 완전 개방 후인 2020년까지 항공 영상을 수집하여 육안으로 감독분류 하였다. 이 결과를 본 연구의 구간으로 나누어 보면, 수문 개방으로 백제보 구간에서 9.7 ha, 공주보 구간에서 42.9 ha, 세종보 구간에서 28.6 ha의 육상 서식처가 확장되었다. 3) Yoon et al. (2021)은 공주보를 기준으로 총 8 km의 종적 범위에서 2017년부터 2021년까지 항공 영상을 수집하여 서식지의 유형별로 감독 분류하였다. 이 결과를 본 연구 구간으로 나누어 보면, 백제보와 공주보를 합한 구간에서 69.3 ha의 육상 서식처 확장이 확인되었다. 4) Lee et al. (2022)은 각 보의 직상류 약 3 km의 종적 범위와 세종보 상류 구간에서 보의 수문 개방 전 (2017년) 및 후 (2020년)에 항공 영상을 수집하여 육안으로 감독 분류하였다. 이 결과를 본 연구 구간으로 나누어 보면 수문 개방으로 백제보 구간에서 39.0 ha, 공주보 구간에서 23.2 ha, 세종보 구간에서 32.6 ha의 육상 서식처가 확장되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 보 수문 개방으로 형성된 모래톱

보의 수문 개방으로 형성된 모래톱을 추적하기 위하여 수문 개방 전후에 수집한 6 시점의 Sentinel-2 영상에서 NDWI를 계산하였다. 이 NDWI에서 육역과 수역을 구분하기 위한 Otsu의 임계값은 영상 촬영시기에 따라서 차이가 있었다(Table 1). 이 임계값은 촬영일 2019년 1월 13일의 -0.0573으로부터 2021년 11월 28일의 0.1367의 범위이었다. 선정된 Otsu의 임계값보다 작은 NDWI을 갖는 지역을 육역으로 구분하여 보 수문 개방으로 새롭게 노출된 모래톱의 분포도를 작도하였고 면적을 계산하였다 (Fig. 4, Table 2). 금강에서 NDWI에 의한 수역 경계의 구분은 실제 영상에서 수역 경계와 일치하였다. 백제보 구간에서 보 개방 전 홍수터의 면적은 625.0 ha이었고, 부분 개방 후 66.4 ha, 완전 개방 후

Table 1. Otsu's threshold of normalized difference water index for distinguishing between land and water areas from multispectral images of Sentinel-2 at various time points

Date	Otsu's threshold value
October 30, 2017	-0.0386
January 3, 2018	-0.0239
January 13, 2019	-0.0573
March 8, 2020	0.0484
February 21, 2021	-0.0136
November 28, 2021	0.1367
Mean (range)	0.0086 (-0.0573 - 0.1367)

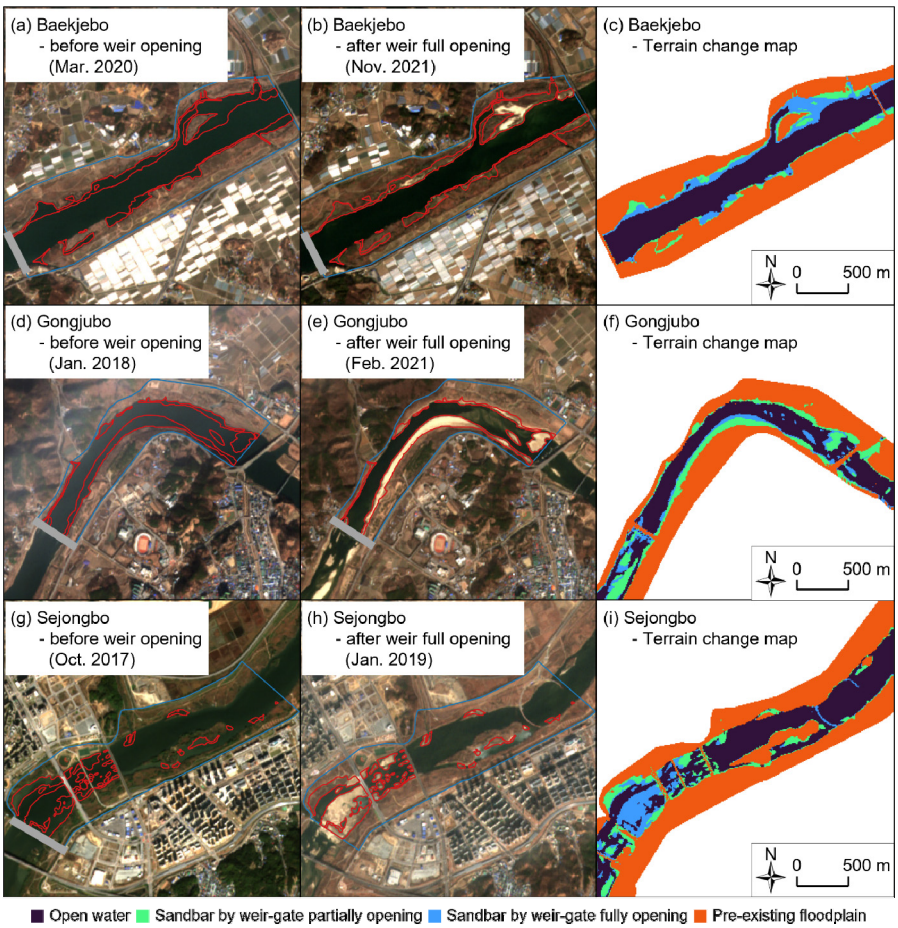

Fig. 4. Satellite imagery showing a major section before and after the weir-gate was opened (a - h), and the terrain change map created by binarizing the imagery with an optical index (c - i) in the Geumgang River, South Korea. The gray lines in the satellite image represent the weir in each section. The blue line is the 3 km upstream of the weir with supervised classification, and the red line is the classified sandbar.

Table 2. Area of the different habitat types calculated by optical indices from multispectral images taken from satellites at the time of opening of the weir-gate in Geumgang River, South Korea

Section	Habitat area (ha)				Total
	Sandbar exposed by weir-gate opening		Pre-existing floodplain	Open water	
	After partial opening	After full opening			
Baekjebo	66.4 (5%)	103.4 (8%)	625.0 (49%)	479.1 (38%)	1273.9 (100%)
Gongjubo	91.7 (11%)	31.6 (4%)	384.8 (48%)	300.7 (37%)	808.8 (100%)
Sejongbo	61.1 (4%)	25.5 (2%)	919.1 (64%)	439.8 (30%)	1445.5 (100%)

Table 3. Comparisons of the habitat area estimated by the supervised classification and by unsupervised classification using multispectral satellite imagery in the test sections of the Geumgang River, South Korea

Section	Supervised classification	Unsupervised classification (ha)			Performance indicator (%)		
		Sandbar	Others	Total	Sensitivity	Specificity	Accuracy
Baekjebo	Sandbar	36.7	1.8	38.5	95.3	99.4	98.8
	Others	1.2	209.4	210.6			
Gongjubo	Sandbar	24.3	1.1	25.3	96.0	98.8	98.3
	Others	1.3	110.1	111.4			
Sejongbo	Sandbar	28.7	1.2	29.9	96.0	96.6	96.5
	Others	6.0	170.0	176.0			

103.4 ha의 모래톱이 새롭게 형성되었다. 공주보 구간에서 보 개방 전 홍수터의 면적은 384.8 ha이었고, 부분 개방 후 91.7 ha, 완전 개방 후 31.6 ha의 모래톱이 새롭게 노출되었다. 마지막으로 세종보 구간에서는 개방 전 홍수터의 면적이 919.1 ha이었고, 부분 개방 후 61.1 ha, 완전 개방 후 25.5 ha의 모래톱이 형성되었다. 금강에서 백제보의 수문 운영은 공주보 직하류까지 영향을 주고, 마찬가지로 공주보의 수문 운영은 세종보 직하류까지 영향을 준다 (Jeong and Jung 2015). 반면 세종보의 수문 운영은 보 상류 약 10 km까지 수위에 영향을 미치기 때문에 세종보에서 상류로 10 km 이상 되는 구간은 보 운영의 영향을 받지 않는 대조군으로 활용할 수 있다 (Kim et al. 2021, Lee et al. 2022). 본 연구에서도 공주보 및 세종보 직하류까지는 각각 백제보 및 공주보의 수문 개방에 의하여 넓은 모래톱이 형성되었다. 그러나 세종보 구간에서는 보 상류 약 10 km에 위치한 미호강 유입부보다 상류 구간에서는 모래톱 형성이 확연히 감소하였다.

3.2 다분광 위성 영상 분석 방법의 검증

감독 분류로 작도된 모래톱 지도와 본 연구의 다분광 위성 영상 분석 방법으로 작도된 지도를 교차 분석하였다. 본 연구에서 개발된 방법은 모든 평가 지표에서 높은 성취도를 나타내었고 지역에 따른 편차가 적어서 그 성능이 매우 우수한 것으로 판단되었다 (Table 3). 모래톱의 탐지 성능 지표로서 민감도는 95.3% - 96%의 범위로 매우 높았다. 또한 특이도는 96.6% - 99.4%이었는데, 이는 모래톱이 아닌 유형을 모래톱으로 오분류된 비율이 0.6% - 3.4%로 매우 낮다는 것을 의미한다. 최종적으로 정확도도 96.5% - 98.8%로서 두 지도의 모래톱 분포가 매우 유사함을 의미한다.

3.3 기존 연구 결과와의 비교

기존의 연구와 비교하면 오차율은 평균 53%이었고, 그 범위가 최대 255%, 최소 2%로 그 폭이 매우 컸다 (Table 4). 이러한 차이는 1) 조사 시점 간 지형의 변화, 2) 노출/침수에 큰 영향을 받는 수변부에 대한 본 연구 탐지 방법의 민감성, 3) 또한 기존의 연구의 육안 탐지 방법의 편차에 의한 것으로 판단된다. 특히 높은 오차율을 보이는 곳은 공주보 직하류 3 km 구간이었는데 이는 Kim et al. (2021)은 2020년 하반기, 본 연구는 2021

Table 4. Comparisons of the areas of sandbar exposed by the weir-gate opening between previous studies and this study in the Geumgang River, South Korea

Case	Data source	Exposed sandbar (ha)		
		Baekjebo	Gongjubo	Sejongbo
I	Ock et al. (2020)	-	11.8	19.8
	This study	-	20.2 (+71%)	32.0 (+62%)
II	Kim et al. (2021)	9.7	42.9	28.6
	This study	34.4 (+255%)	49.7 (+16%)	33.4 (+17%)
III	Yoon et al. (2021)	92.5		-
	This study	46.1 (-23%)		-
IV	Lee et al. (2022)	39.0	23.2	32.6
	This study	38.2 (-2%)	27.1 (+17%)	37.5 (+15%)

년 하반기 영상을 이용하여 이 기간의 지형변화로 발생하였기 때문인 것으로 생각된다. 마찬가지로 Ock et al. (2020) 과의 공주보 구간, 세종보 구간에서도 오차율이 각각 71%, 62%로서 다소 높았는데, 이는 Ock et al. (2020)은 2018년 상반기 영상을 사용했지만 본 연구에서는 공주보 구간에서 2021년 상반기, 세종보에서 2019년 상반기의 영상을 사용하여 조사시점이 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 다분광 위성영상을 이용하여 보의 수문 개방에 따른 모래톱 형성을 원격 추적하는 방법을 제안하고 이를 평가하였다. 본 연구의 방법은 위성 영상의 통계적 처리를 통한 방법으로서 기존의 감독 분류 방법보다 더 넓은 구간을 적은 자원을 동원하여 객관적으로 새로 노출된 모래톱을 탐지할 수 있는 장점이 있었다. 특히 여러 시점을 동시에 비교함으로 시간의 흐름, 보의 수문 운영 등 특정 사건에 의한 경관 변화를 추적할 수 있다. 여기에서 개발한 원격탐사 방법에 의하여 얻어진 지형적 정보를 수리, 수문 자료 및 식생 자료 등과 결합하면 하천 생태계의 변화를 이해하는데 도움을 줄 것으로 기대한다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2020003050002).

References

Gao, B.C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment 58(3): 257-266.

Gurnell, A.M., Bertoldi, W., Tockner, K., Wharton, G., and Zolezzi, G. 2016. How large is a river? Conceptualizing river landscape signatures and envelopes in four dimensions. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water 3(3): 313-325.

Jeong, A. and Jung, K. 2015. Analysis of long-term riverbed-level and flood stage variation due to water gate operation of multi-functional weirs at Geum River. Journal of Korea Water Resources Association 48(5): 379-391. (in Korean)

Kim, D., Lee, C., Kim, H., Ock, G., and Cho, K.H. 2021. Changes in landscape characteristics of stream habitats with the construction and operation of river-crossing structures in the Geum-gang River, South Korea. Ecology and Resilient Infrastructure 8(1): 64-78. (in Korean)

Lee, C., Kim, H., and Cho, K.H. 2022. Spatial Distribution and Successional Changes of Riparian Vegetation on Sandbars Exposed after Watergate-Opening of Weirs in the Geumgang River, South Korea. Ecology and Resilient Infrastructure 9(3): 194-205. (in Korean)

Marcus, W.A. and Fonstad, M.A. 2010. Remote sensing of rivers: the emergence of a subdiscipline in the river sciences. Earth Surface Processes and Landforms 35(15): 1867-1872.

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) 2023. Geumgang River Basic Plan Report. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, South Korea. (in Korean)

Ock, G., Choi, M., Kim, J.C., Park, H.G., and Han, J.H. 2020. Evaluation of habitat diversity changes by weir operation of the Sejongbo weir in Geum river using

high-resolution aerial photographs. Ecology and Resilient Infrastructure 7(4): 366-373. (in Korean)

Otsu, N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 9(1): 62-66.

Pau, G., Fuchs, F., Sklyar, O., Boutros, M., and Huber, W. 2010. EBImage-an R package for image processing with applications to cellular phenotypes. Bioinformatics 26(7): 979-981.

Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Bertrand, M., Bizzi, S., Carbonneau, P., ... and Slater, L. 2020. Remotely sensed rivers in the Anthropocene: State of the art and prospects. Earth Surface Processes and Landforms 45(1): 157-188.

QGIS.org. 2023. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org.

R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

Tomsett, C. and Leyland, J. 2019. Remote sensing of river corridors: A review of current trends and future directions. River Research and Applications 35(7): 779-803.

Yoon, H.Y., Yun, K.S. and Jang, D. 2021. A study on the characteristics of depositional landform change in the Geum River channel using unmanned aerial vehicle: focusing on before and after the opening gate of Gongju Weir. Journal of the Korean Geomorphological Association 28(4): 1-13. (in Korean)