Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 25(1) 2022, pp.101-119 ISSN 1226-9719(Print)
https://doi.org/10.11108/kagis.2022.25.1.101 ISSN 2287-6952(Online)

무인항공기 기반 다중분광영상을 이용한 낙동강 Chlorophyll-a 및 녹조발생지수 분석*

김흥민[1] · 최은영[2] · 장선웅[3※]

Analysis of Chlorophyll-a and Algal Bloom Indices using Unmanned Aerial Vehicle based Multispectral Images on Nakdong River*

Heung-Min KIM[1] · Eunyoung CHOE[2] · Seon-Woong JANG[3※]

요 약

기존의 녹조 모니터링은 현장 채수에 의한 국지적인 조사로 인해 녹조 발생 및 확산 규모 등에 대한 공간적 분포 파악에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 무인항공기 및 다중분광센서를 이용하여 녹조 모니터링을 수행하고, 녹조 분포 현황 자료를 산출하고자 하였다. 조류 우심구간인 낙동강 하류에 위치한 물금·매리 구간을 대상으로 현장조사 및 다중분광영상 촬영을 수행하였다. 현장 채수 시료의 Chlorophyll-a(Chl-a) 값과 분광지수(Spectral Index)들의 상관관계로 도출한 Chl-a 추정식을 비교 분석하였다. 그 결과 분광지수 중 Maximum Chlorophyll Index(MCI)가 가장 높은 통계적 유의성(R^2=0.91, RMSE=8.1mg/㎥)을 나타냈다. Chl-a 농도가 가장 높은 2021년 08월 05일 영상에 MCI를 적용하여 녹조 분포 지도를 작성하였고, 이로부터 산출한 수계 면적은 1.7㎢이며, 조류경보제 발령 단계 중 경계(Warning) 면적은 1.03㎢(60.56%), 대발생(Algal Bloom) 면적은 0.67㎢(39.43%)를 나타내었다. 또한 연구기간 동안(2021년 07월 01일~2021년 11월 01일) 취득된 영상 내 "경계" 이상에 해당하는 영역에 대한 발생 일수를 계산한 결과, 하천 전 구간에서 최소 12회에서 최대 19회까지 "경계" 이상의 Chl-a 농도가 관측되었다. 본 연구에서 산출한 다중분광영상의 Chl-a 농도와 녹조발생지수는 녹조에 대한 공간적 분석이 용이하므로 조류경보제와 같은 현장 채수 위주의 지점 단위 자료를 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 낙동강, 녹조, 녹조발생지수, 다중분광센서, 무인항공기, Chlorophyll-a

2022년 02월 03일 접수 Received on February 03, 2022 / 2022년 03월 11일 수정 Revised on March 11, 2022 / 2022년 03월 14일 심사완료 Accepted on March 14, 2022

* 이 논문은 2021년 낙동강수계 환경기초조사사업의 '드론 분광영상 활용 낙동강 녹조 모니터링' 의 지원으로 수행되었음.

1 (주)아이렘기술개발 기업부설연구소 연구소장 Director of Research Institute, Research Institute, IREM tech. Co., Ltd.
2 환경부 낙동강유역환경청 측정분석과 연구사 Researcher, Monitoring and Analysis Division, Nakdong River Basin Environment Office, Ministry of Environment.
3 (주)아이렘기술개발 대표이사 CEO, IREM tech. Co., Ltd.
※ Corresponding Author E-mail : jsw@iremtech.co.kr

ABSTRACT

Existing algal bloom monitoring is based on field sampling, and there is a limit to understanding the spatial distribution of algal blooms, such as the occurrence and spread of algae, due to local investigations. In this study, algal bloom monitoring was performed using an unmanned aerial vehicle and multispectral sensor, and data on the distribution of algae were provided. For the algal bloom monitoring site, data were acquired from the Mulgeum · Mae-ri site located in the lower part of the Nakdong River, which is the areas with frequent algal bloom. The Chlorophyll-a(Chl-a) value of field-collected samples and the Chl-a estimation formula derived from the correlation between the spectral indices were comparatively analyzed. As a result, among the spectral indices, Maximum Chlorophyll Index (MCI) showed the highest statistical significance(R^2=0.91, RMSE=8.1mg/㎥). As a result of mapping the distribution of algae by applying MCI to the image of August 05, 2021 with the highest Chl-a concentration, the river area was 1.7㎢, the Warning area among the indicators of the algal bloom warning system was 1.03㎢(60.56%) and the Algal Bloom area occupied 0.67㎢(39.43%). In addition, as a result of calculating the number of occurrence days in the area corresponding to the "Warning" in the images during the study period (July 01, 2021~November 01, 2021), the Chl-a concentration above the "Warning" level was observed in the entire river section from 12 to 19 times. The algal bloom monitoring method proposed in this study can supplement the limitations of the existing algal bloom warning system and can be used to provide information on a point-by-point basis as well as information on a spatial range of the algal bloom warning area.

KEYWORDS : Algal Bloom, Algal Bloom indices, Chlorophyll-a, Nakdong river, Multispectral Sensor, Unmanned Aerial Vehicle

서 론

녹조현상은 과거부터 현재까지 지속적으로 발생하고 있으며, 최근 기후변화로 인한 수온 상승과 더불어 수환경 오염으로 조류의 증식으로 인한 녹조 발생 빈도 및 강도가 점점 증가하는 추세다(Bates *et al.* 2008; Lee and Lee, 2012; Park, 2014; Thackeray *et al.* 2008). 녹조현상에 따른 수질오염으로 상수원 안전 문제에 대한 불안감과 용수의 수질 저하 문제 등이 야기되고 있다(Srivastava *et al.*, 2015). 이와 같이 녹조현상은 경제적 · 환경적으로 문제를 발생시키기 때문에 사전 예방 및 지속적인 모니터링을 통해 감시 · 관리할 필요가 있다(Kim *et al.* 2019).

낙동강 유역은 전국 면적의 23.9%를 차지하는 대규모 하천이며(Jang *et al.* 2015), 유역 내 여러 대도시들이 자리하고 있다. 낙동강은 중요한 용수 공급원으로 이용되고 있지만 수질 환경여건이 취약하고 녹조 관리에 어려움이 있으므로 조류(Algae) 우심지역으로 여겨지며, 이에 대한 신속하고 지속적인 모니터링이 필요하다.

환경부에서는 조류 발생으로 인한 상수원 안정성 확보를 위해 호소, 하천을 대상으로 조류경보제 지점을 지정하여 지속적으로 모니터링하고 있고 주로 현장 채수에 의한 방식으로 이루어지고 있다. 현장 채수는 인력적 · 시간적 소모가 많고, 지점 조사로 인해 녹조의 발생 및 확산 규모 등 공간적 분포 파악에 한계가 있다

(Su and Chou, 2015). 이를 보완하기 위해 최근 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)를 이용한 하천 모니터링이 수행되고 있지만 무인항공기의 일반촬영 사진은 육안판독에 그쳐 녹조의 객관적 분석에는 어려움이 있다.

넓은 지역의 녹조 관측을 위해 위성영상을 이용한 다양한 원격탐사 기법이 제안되고 있다. 해양에서는 Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS), MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), Geosationary Ocean Color Imager (GOCI) 등을 이용하여 조류 모니터링의 지표로써 Chlorophyll-a(Chl-a) 관측 연구가 활발하게 이뤄지고 있다. 그러나 해양에 비해 공간적 범위가 좁은 하천의 경우, 낮은 공간해상도로 인하여 이들 위성영상은 적용이 어려워 비교적 고해상도인 Landsat-8, Sentinel-2 A/B 등을 이용한 녹조 관측 연구가 진행되었다. Ha et al. (2017)은 호수에서 Chl-a 추정을 위해 현장 반사도 측정 및 Sentinel-2A 영상의 밴드비를 이용하여 최적의 밴드비를 산출하였고, Chl-a 추정 시 선형 방정식에 비해 지수 방정식이 높은 상관성을 나타내는 것을 확인하였다. Byeon *et al.*(2021)은 하천의 녹조 탐지에 있어서 중 · 저해상도 위성영상의 적용성과 단일지수에 의한 방식의 한계점을 개선하고자 Sentinel-2 위성의 고해상도 영상에 혼합지수를 적용한 녹조 탐지를 수행하였다.

이러한 위성영상을 이용한 녹조 모니터링은 위성의 방문 주기로 인하여 사용하고자 하는 시기에 신속하게 자료 획득하는데 한계가 있지만 무인항공기는 현장에 쉽게 접근할 수 있어서 신속한 모니터링 및 고해상도 영상 취득이 가능하다. 또한 분광센서(다중분광센서 및 초분광센서)의 소형화로 무인항공기에 탑재 가능한 형태로 발전되어 이를 이용한 하천 모니터링 연구가 활발하게 진행되고 있다(Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2017; Choe *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021). Kim *et al.*(2017)은 무인항공기 탑재 다중분광센서 및 지상분광 광도계 측정값을 이용하여 반사도 특성을 파악하였고, 이를 남조류 세포수와 비교하여 남조류 세포수의 추정식을 산출하였다. Kim *et al.*(2021)은 하천의 Chl-a 지도를 평가하기 위해 무인항공기 탑재 다중분광센서 및 Chl-a 관측용 무인선을 이용한 하이브리드(Hybrid) 접근 방법을 제안하였다. Choe *et al.*(2021)은 무인항공기 다중분광 영상 및 수질분석결과를 이용하여 분광지수 적용성을 평가하였다. 그러나 선행연구는 단일 시기의 영상을 이용한 분석으로 녹조의 공간적 분포 및 강도의 변화, 위치에 따른 녹조의 발생 빈도 등에 대한 분석은 수행되지 않아 지속적인 녹조 모니터링 적용에 한계가 있을 것으로 사료된다.

초분광센서로 취득된 영상은 다중분광영상보다 향상된 분광 해상도를 가지고 있지만, 수 백 개의 밴드를 사용하여 영상분류를 수행할 경우 인접한 밴드간의 상관성이 높아 처리 시간이 증가하고 밴드 수에 비례하여 처리되는 자료의 양 때문에 저장용량이 증가한다(Cho and Lee, 2014). 다중분광 영상은 데이터에 저장된 밴드가 분리된 형태이기 때문에 각 픽셀에 해당하는 독립된 데이터 생산이 가능하며(Park *et al.*, 2014), 수 개의 분광밴드 자료로 초분광 영상에 비해 저장용량 및 처리시간이 감소하므로 당일 영상 취득 및 처리가 가능해 신속하게 녹조의 강도 및 분포범위를 파악할 수 있다.

현재 하천 녹조 모니터링을 위해 물환경정보시스템에서 항공기 탑재 초분광 센서의 영상을 이용하여 분석한 조류항공영상을 제공한다. 조류항공영상 취득을 위해 항공기 및 초분광 센서의 운용에 따른 많은 시간과 비용이 필요하다. 또한 조류항공영상은 낙동강 수계에서 경상북도 구미시 구미보~경상남도 밀양시 수산대교 범위의 자료를 제공하여 낙동강 하류의 녹조 모니터링 자료는 부재한 실정이다. 이에 본 연구에서는 낙동강 하류를 대상으로 신속하게 낙동강의 녹조 발생을 모니터링하기 위하여 무인항공기 및 다중분광센서를 이용하여 취득한 영상으로 Chl-a 농도 및 녹조발생지수를 산출하고자 하였다. 이를 위해 녹조 모니터링에 활용 가능한 분광지수들의 정확도를 평가하고, 조류 우심구간에 대한 다중시기 녹조 분포 지도로부터 공간적 범위의 녹조 분포 현황 자료를 산출하여 공

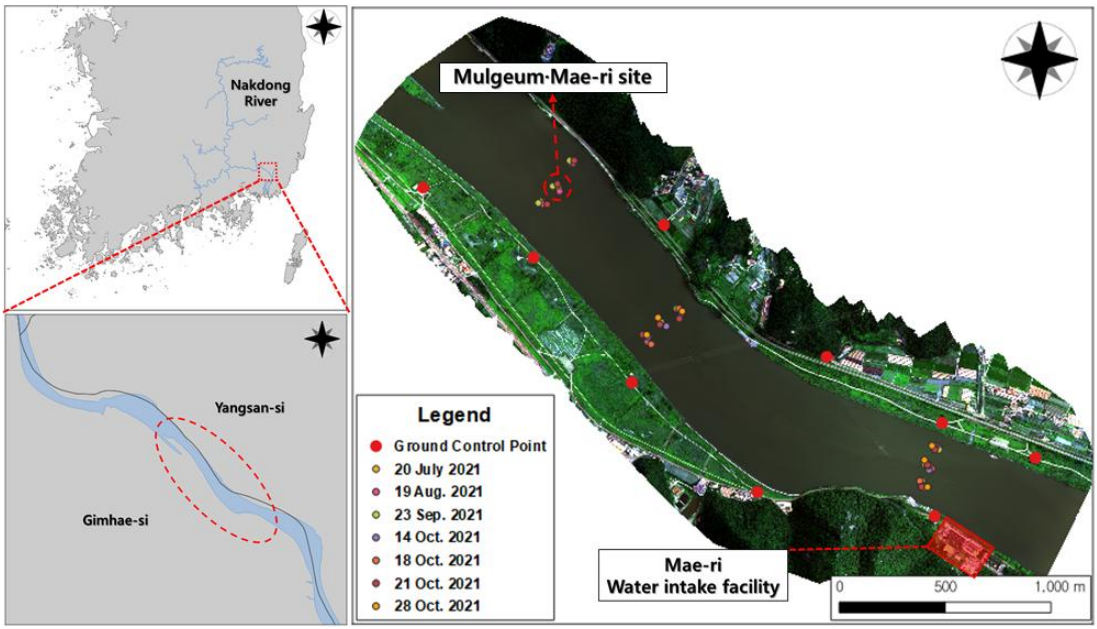

FIGURE 1. Study area

간정보의 활용성을 높이고자 하였다.

연구 자료 및 방법

1. 연구 지역

본 연구의 녹조 모니터링 구간은 낙동강 하류에 위치한 조류경보제 운영지점 중 물금·매리로 선정하였다. 물금·매리 지점은 2020년부터 조류경보제로 운영되었으며, 2020년 기준 조류경보제 발령 기간은 총 34일로 녹조 발생이 빈번한 조류 우심구간이다(Ministry of Environment, 2021). 관측범위는 물금·매리 지점에서 매리 취수장까지 3㎞ 구간을 대상으로 하였다(그림 1).

2. 다중분광 영상 취득

물금·매리 구간에서 수직이착륙(VTOL, Vertical Take-Off and Landing) 무인항공기를 사용하여 다중분광영상을 촬영하였다. VTOL 무인항공기는 이착륙 장소가 필요한 고정익의 단점과 장시간 넓은 범위의 비행이 어려운 회전익의 단점을 보완한 형태이다. 이착륙 시 회전익과 동일하게 기체의 프로펠러가 수직으로 양력을 일으켜 좁은 장소에서 이착륙이 가능하며, 특정고도에서 프로펠러를 수평으로 전환하여 날개의 양력을 이용해 장시간 넓은 범위의 비행이 가능하도록 설계되었다. 본 연구에서 VTOL 무인항공기는 Qauntum system의 Trinity F90+를 사용하였고 날개길이(Wingspan) 2,300㎜, 최대 비행시간 90분, 최대통신거리 7.5㎞에 달한다(그림 2a). 다중분광센서는 Micasense의 RedEdge-MX를 탑재하였다(그림 2b). RedEdge-MX는 가시영역(Blue(475nm, FWHM(Full Width at Half Maximum) : 20nm), Green(560nm, FWHM : 20nm), Red(668nm, FWHM : 10nm))을 포함하여 Chl-a 탐지가 가능한 Red-edge(717nm, FWHM : 10nm), NIR(Near-InfraRed)(840nm, FWHM : 40nm) 파장대에 대한 영상을 수집할 수 있다. 또한 GPS 모듈과 DSL(DownWelling Light Sensor)로 수집된 촬영 당시의 고도, 위치정보, 광 조건에 대한 자료를 통해 영상 병합 및 반사도 산출이 가능하다. 무인항공촬영은

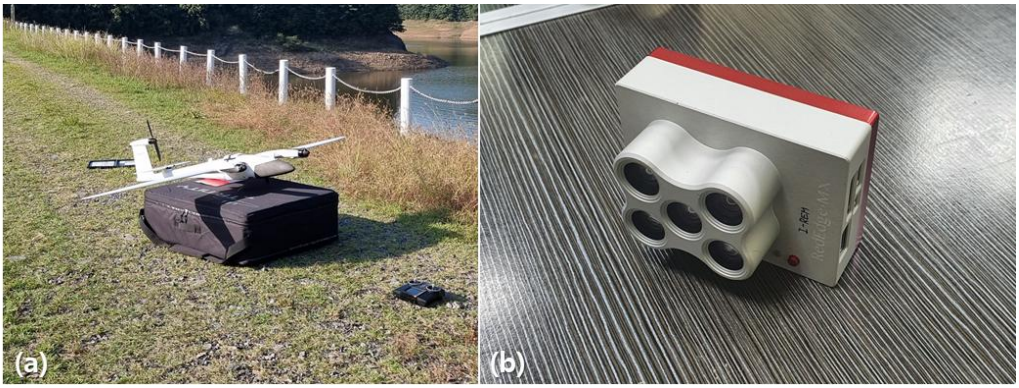

FIGURE 2. Shape of unamnned aerial vehicle and multispectral sensor

TABLE 1. Images and water sampling date

Image acquisition date			Water sampling date
2021.07.01.,	2021.07.12.,	2021.07.20.,	2021.07.20.
2021.07.26.,	2021.08.05.,	2021.08.09.,	2021.08.19.
2021.08.19.,	2021.08.26.,	2021.08.30.,	2021.09.23.
2021.09.08.,	2021.09.23.,	2021.09.27.,	2021.10.14.
2021.10.01.,	2021.10.05.,	2021.10.08.,	2021.10.18.
2021.10.14.,	2021.10.18.,	2021.10.21.,	2021.10.21.
2021.10.25.,	2021.10.28.,	2021.11.01.	2021.10.28.

2021년 07월 01일부터 11월 01일까지 총 21회 수행하였다(표 1).

하천을 대상으로 한 무인항공영상 촬영 시 단일 영상에 하천만 포함된 경우 하천의 특징점 추출이 어려워 정사영상 제작에서 수계영역이 병합되지 않는 오류가 발생할 수 있다. 더욱이 물금 · 매리 구간은 주변의 산으로 인하여 특징점 추출이 어려우며 지형의 높이 차이가 크게 발생하므로 다중분광센서의 화각 및 하천 폭을 고려하여 비행경로 설정 및 촬영 계획을 수립하였다. 촬영 시 비행고도는 550m, 촬영 방향 중복도 85%, 인접 코스 중복도 80%로 설정하였고, 촬영 구간에 대한 다량의 특징점 추출을 위해 Double grid로 비행하여 자료를 수집하였다. 다중분광센서로 취득된 영상을 반사도 영상으로 변환하기 위하여 비행 전 · 후 파장대에 따라 일정한 반사도를 가지는 Calibration panel을 이용하여 반사도를 산출하였다. 촬영 구간에서 취득된 개별 영상들은 영상 처리 소프트웨어인 Pix4D S.A.의 Pix4D Mapper를 이용하여 한 장의 정사영상으로 제작되었으며, 비행 전 촬영된 Calibration panel를 이용하여 반사도로 변환하였다.

또한, 동일한 지점에서 발생한 녹조의 시계열 변화를 파악하기 위해 다중분광영상 촬영 범위 내 식별 가능한 9개의 지형지물에 대하여 RTK-GNSS 장비를 이용한 지상기준점(GCP, Ground Control Point) 측량을 수행하여 정사영상의 위치 정확도를 향상시키고자 하였다(그림 3). 지상기준점의 평면 오차는 「항공사진측량 작업규정」(2020)에서 제시하는 ±0.5m 이내로 규정하고 있으며, 본 연구에서는 지상기준점 평면 오차를 평균 ±0.12m로 후처리를 진행하였다.

지상기준점을 이용한 기하보정 후 ±0.12m 이내의 위치오차가 발생할 수 있으며 위치오차를 최소화하기 위해 영상 처리 소프트웨어인 ENVI(Harris Geospatial Solutions, Inc.)의 Image registration 기능을 이용하였다. Image

FIGURE 3. Ground control point survey for geometric correction of unmanned aerial image

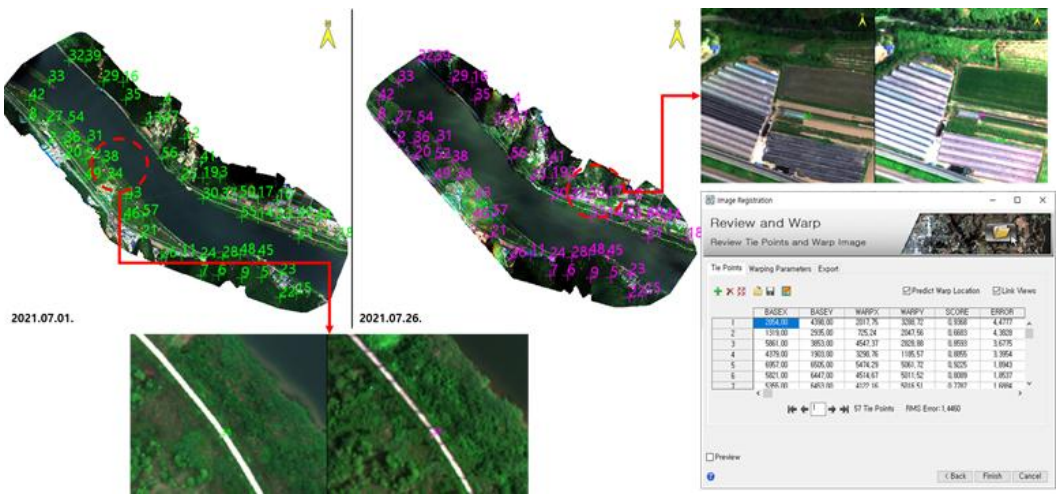

FIGURE 4. Image registration processes

registration은 두 개의 영상에서 특징점을 추출하여 동일한 특징점 간 연결을 통해 픽셀을 일치시키는 방법으로(그림 4), 최초 촬영 날짜인 2021년 07월 01일을 기준으로 모든 일자의 정사영상을 동일한 위치로 일치시켰다.

다중분광영상에서 육지를 제외한 수계영역추출을 위해 McFeeters(1996)이 제안한 Green NDWI(Normalization Difference Water Index)를 적용하였다. Green NDWI는 -1~1의 범위를 가지며 0 이상인 경우 수체로 구분할 수 있다. 구분된 수계영역을 vector 파일로 변환하여 Chl-a 추정을 위한 분광지수 적용 시 수체만 활성화 되도록 마스킹 하였다.

$$NDWI = \frac{R_{Green} - R_{NIR}}{R_{Green} + R_{NIR}} \quad (1)$$

FIGURE 5. Field works: river water sampling(left) and in-situ measurements(right)

3. 현장 수질 측정 및 채수

다중분광영상을 이용한 Chl-a 추정값의 검증을 위해 무인항공영상 촬영과 동일한 시점에 영상 촬영 범위 내 9개 지점에 대한 현장 수질 측정 및 채수를 수행하였다(그림 1). 채수 당시 GPS를 이용하여 채수 지점의 위치정보를 취득하였으며, 위치정보를 점(Point) 자료로 생성하였다. 이후 다중분광영상과 채수 위치정보를 중첩하였고, 채수 지점과 동일한 위치에 해당하는 다중분광영상의 픽셀에 대한 반사도를 이용하여 수질 분석 결과와 비교하였다. 채수 및 수질분석 일자는 표 1과 같으며, 동일한 시기의 다중분광영상을 사용하였다.

4. 분광지수 적용

해양에서 Chl-a 농도는 Blue, Green 파장대를 이용하여 추정이 가능하나, 하천수에 포함된 다량의 부유물과 CDOM(Colored Dissolved Organic Matter)은 Blue 파장대에 분광특징이 나타나므로 Blue, Green 파장대로 Chl-a 추정 시 부유물 및 CDOM으로 인한 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 부유물과 CDOM의 영향을 적게 받는 Red, Red-edge, NIR 파장대를 이용한 3가지 분광지수를 Chl-a 추정식에 적용하여 성능을 비교하였다.

Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI)는 하천이나 연안의 탁한 수역에서 Chl-a 농도 추정을 위해 Mishra and Mishra(2012)에 의해 제안되었는데 식생탐지를 위한 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)와 매우 유사한 형태로 Red, Red-edge를 이용하여 Chl-a 농도를 정성 · 정량적으로 추정하는데 활용되고 있다. Dall' Olmo *et al.*,(2003)은 탁한 수역(Case II water)에서 Chl-a 농도를 추정하기 위해 Chl-a에 민감한 파장대(Red), Chl-a와 근접하여 CDOM의 영향을 제거할 수 있는 파장대(Red-edge), CDOM의 영향이 미치지 않는 파장대(NIR)를 활용한 3Band Ratio(3BR)을 개발하였다. Maximum Chlorophyll Index(MCI)는 MERIS 위성영상에서 Harmful Algal Blooms (HABs)를 탐지하기 위해 Binding et al.(2013)에 의해 제안되었으며, 681㎚와 754㎚의 반사도를 기준선으로 하여 709㎚ 반사도의 기준선으로부터 높이를 측정하여 최대 클로로필 지수를 계산한다. 본 연구에서 Chl-a 농도에 따른 Red-edge의 피크가 관찰 가능하였기 때문에 681㎚, 709㎚, 754㎚ 대신하여 사용가능한 Red (668㎚), Red-edge(717㎚), NIR(842㎚) 밴드를 이용하여 MCI를 계산하였다(표 2).

TABLE 2. Spectral Indices and equations

Spectral Index	Equation
NDCI	$\frac{R_{RE}-R_{Red}}{R_{RE}+R_{Red}}$
3BR	$\left(\frac{1}{R_{Red}}-\frac{1}{R_{RE}}\right)\times NIR$
MCI	$(R_{RE}-R_{Red})-\left[\left(\frac{717-668}{842-668}\right)\times(R_{NIR}-R_{Red})\right]$

ENVI의 BandMath 기능을 이용해 다중분광영상로부터 각 분광지수(표 2)를 계산하여 분광지수 영상을 산출하였다. 분광지수 영상과 Chl-a 농도 실측값의 상관관계를 도출하고 결정계수(Coefficient of determination, R^2)와 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error, RMSE)로 통계적 유의성을 검토하였다. 평균제곱근오차의 산출식은 식 2와 같으며, n은 관측 수, $\hat{Y}$은 추정된 Chl-a 농도, Y는 관측된 Chl-a 농도이다.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

결과 및 토의

1. 시료 분석 결과

물금·매리 구간의 수질현황을 파악하기 위해 조류경보제의 물금·매리 지점과 동일한 지점에서 2021년 07월 01일부터 2021년 11월 01일까지 채수한 시료의 분석 결과를 사용하였다(표 3). 수온은 평균 22.9℃, 최저치는 2021년 10월 28일 17.2℃, 최고치는 2021년 08월 05일 31.1℃로 나타났다. pH는 평균 8.4로 7.4~9.3 범위를 보였다. DO의 평균값은 9.7mg/L이며 DO의 범위는 27.2℃로 높은 수온을 보인 2021년 08월 19일 7mg/L로 가장 낮았으며, 최저 수온을 보인 2021년 10월 28일 12.6mg/L로 가장 높았다. Suspended Sediment(SS)는 평균 9.7mg/L로 2021년 07월 01일 2.4mg/L로 가장 낮았으며 최저 DO를 보인 2021년 08월 19일 23mg/L로 가장 높았다. Chl-a 농도는 평균 43.1mg/㎥이고 높은 수온 및 최저 DO를 보인 2021년 08월 19일에 122.3mg/㎥으로 가장 높았으며, 당시물금·매리 지점의 남조류 세포수는 10,376cells/mL으로 '경계' 단계가 발령되었다(물환경정보시스템 참조). 7월 3일부터 19일까지 지속적으로 강우가 발생했던 기간 직후인 2021년 07월 20일에는 Chl-a 농도가 11.9mg/㎥으로 가장 낮은 값을 나타내었다.

2. 분광지수를 이용한 Chl-a 추정

다중분광영상 및 현장 채수 분석값의 상관관계로부터 Chl-a 농도를 추정하기 위하여 각 자료에 대한 전처리로 사분위(IQR, Inter Quantile Range)를 이용한 이상치 제거를 수행하였다. 사분위는 전체 자료에 대하여 값을 정렬하고 이를 1/4씩 구간을 분할하는 것을 의미하는데, 자료의 구간별로 25% 구간은 Q1, 50% 구간은 Q2, 75% 구간은 Q3, 100% 구간은 Q4로 구분

TABLE 3. The statistics of water quality elements for sampling points

		Water Temp.(℃)	pH	DO (mg/L)	SS (mg/L)	Chl-a (mg/㎥)
Mulgeum·Mae-ri	MIN	17.2	7.4	7	2.4	11.9
	MAX	31.1	9.3	12.6	23	122.3
	AVG	22.9	8.4	9.7	9.7	43.1

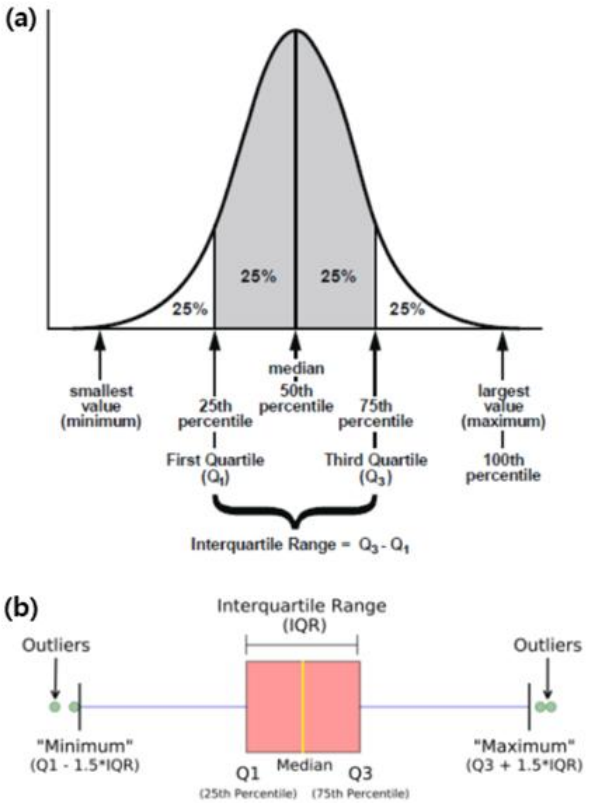

FIGURE 6. Concept of data pre-processing for statistical analysis: (a) IQR(Interquartile range), (b) Method of removing outliers using IQR

한다(그림 6a). 그림 6(a)의 IQR(InterQuartile Range)×1.5에 의해 생성된 범위를 이용해 최솟값과 최댓값을 결정하고(그림 6b) 최솟값보다 낮거나 최댓값보다 높은 범위의 자료를 이상치로 판단하여 제거한다. 총 58개의 시료 중 이상치 제거 방법을 이용하여 선별된 52개의 시료 분석 결과를 Chl-a 추정식 산출에 활용하였다.

다중분광영상에서 계산한 NDCI, 3BR, MCI를 이용하여 Chl-a 추정식을 산출하고 상관성 분석을 통해 통계적 유의성을 비교하였다. 그 결과 NDCI의 결정계수(R^2)는 0.83, RMSE는 10.8mg/㎥, 3BR의 결정계수(R^2)는 0.79, RMSE는 11.9mg/㎥, MCI의 결정계수(R2)는 0.91, RMSE는 8.1mg/㎥로 MCI가 가장 높은 통계적 유의성을 나타냈다(표 4).

각 분광지수에 의한 Chl-a 추정값과 실측값을 비교하였는데, NDCI는 80~100mg/㎥의 범위에서 과소 추정되는 경향을 보이며 이보다 낮은 농도에서는 과대 추정하는 경향을 보였다. 3BR은 NDCI와 동일하게 80~100mg/㎥의 범위에서 과소 추정하는 경향을 보이고 이보다 낮은 농도에서는 과대 추정되는 경향을 나타냈다. 특히 NDCI에 비해 60~80mg/㎥의 범위에서 측정치에 비해 Chl-a 농도를 과대 추정하며 오차가 증가한 것으로 보인다(그림 7d). 반면 MCI는 40mg/㎥ 이하의 Chl-a 범위에 대한 오차는 크게 발생하지만 40mg/㎥ 이상의 Chl-a 범위에서는 약하게 과소 추정되거나 실측값과

TABLE 4. Performance of Chl-a estimation using each spectral index

	NDCI	3BR	MCI
R^2	0.83	0.79	0.91
RMSE(mg/㎥)	10.8	11.9	8.1

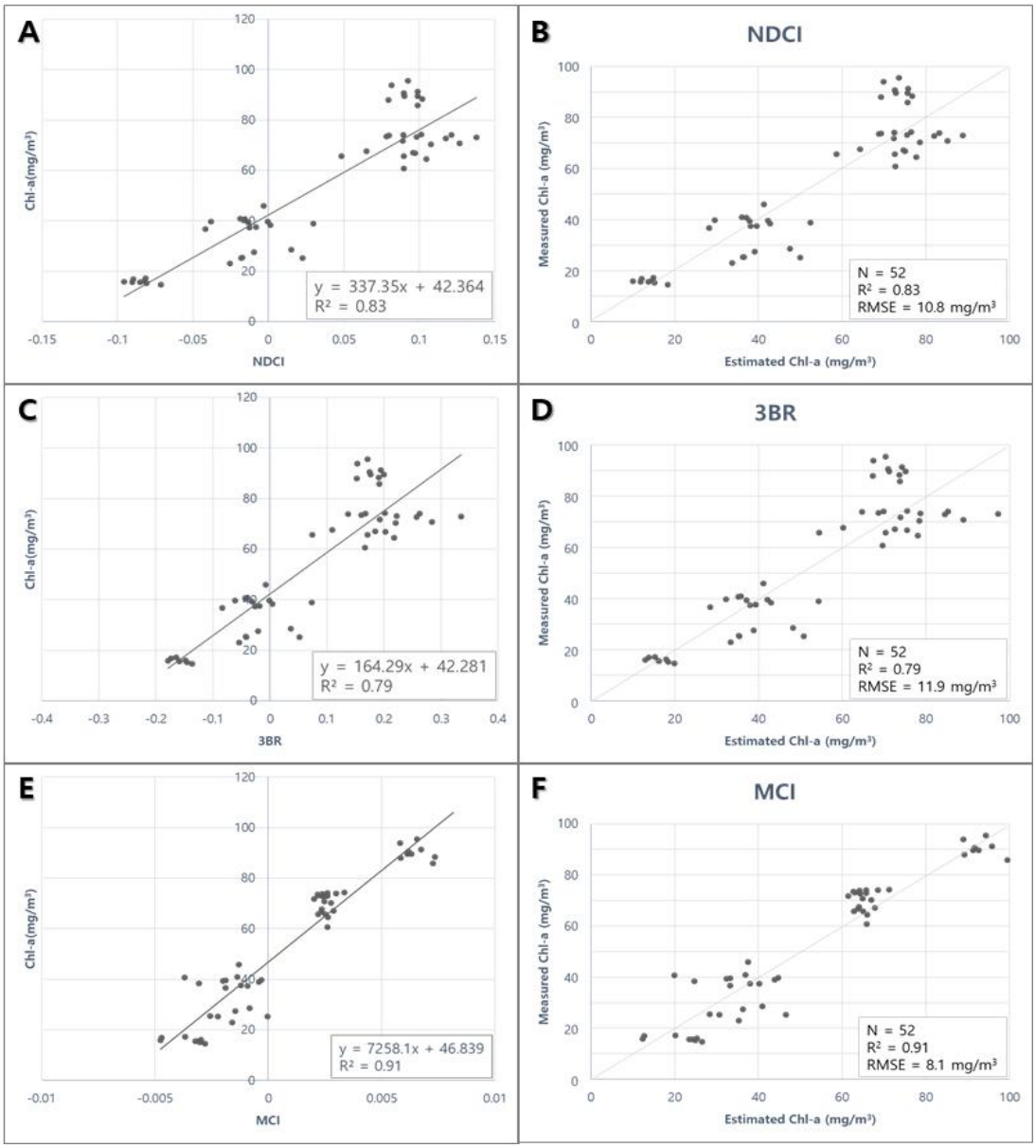

FIGURE 7. The results of regression analysis between spectral indices and Chl-a concentrations (left: A, C, E) and comparisons between measured and estimated Chl-a concentrations (right: B, D, F)

추정값이 매우 유사한 결과를 보였고, 실측값과 추정값의 분포도에서 분포도에서 데이터가 1:1 선에 근접한 것으로 나타났다(그림 7f).

따라서 본 연구에서 적용된 분광지수 중 가장 높은 결정계수(R^2=0.91)와 가장 낮은 오차값(RMSE=8.1mg/㎥)을 나타낸 MCI가 연구 지역의 Chl-a 추정에 최적임을 확인하였으며, MCI로 산출한 식 3을 이용하여 물금 · 매리 구간에 대해 Chl-a 농도를 계산하여 녹조 분포지도를 작성하였다.

$$Chl-a = 7258.1 \times MCI + 46.839 \quad (3)$$

3. Chl-a 기반 녹조 분포지도 산출

통계적 유의성이 가장 높은 결과를 보인 MCI 영상을 이용하여 Chl-a를 계산하고 일자별 녹조의 공간적 분포를 파악하였다(그림 8, 9). 2021년 7월 1일 물금 · 매리 구간의 Chl-a 농도는 평균 29.8mg/㎥을 나타냈으나 장마로 인한 집중호우로 7월 20일 Chl-a 농도는 19.6mg/㎥까지 감소하였다. 이후 일조량 및 수온증가로 인해 Chl-a 농도는 지속적으로 증가하여 2021년 8월 5일 평균 Chl-a 농도가 179.4mg/㎥으로 가장 높은 농도를 나타내며 하천 전 구간에 걸쳐 녹조가 발생하였다. 고농도의 Chl-a는 2021

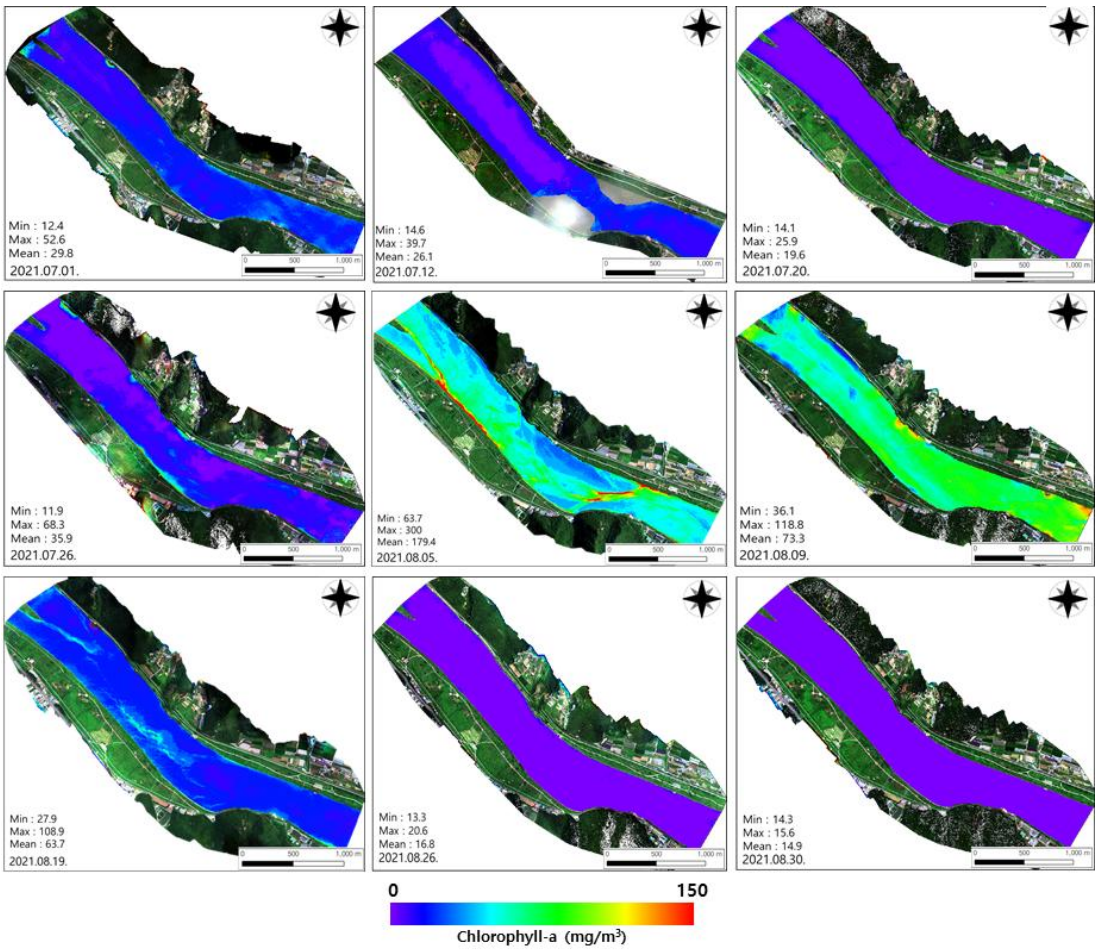

FIGURE 8. Distribution map of algal bloom(From July 1, 2021 to August 30, 2021)

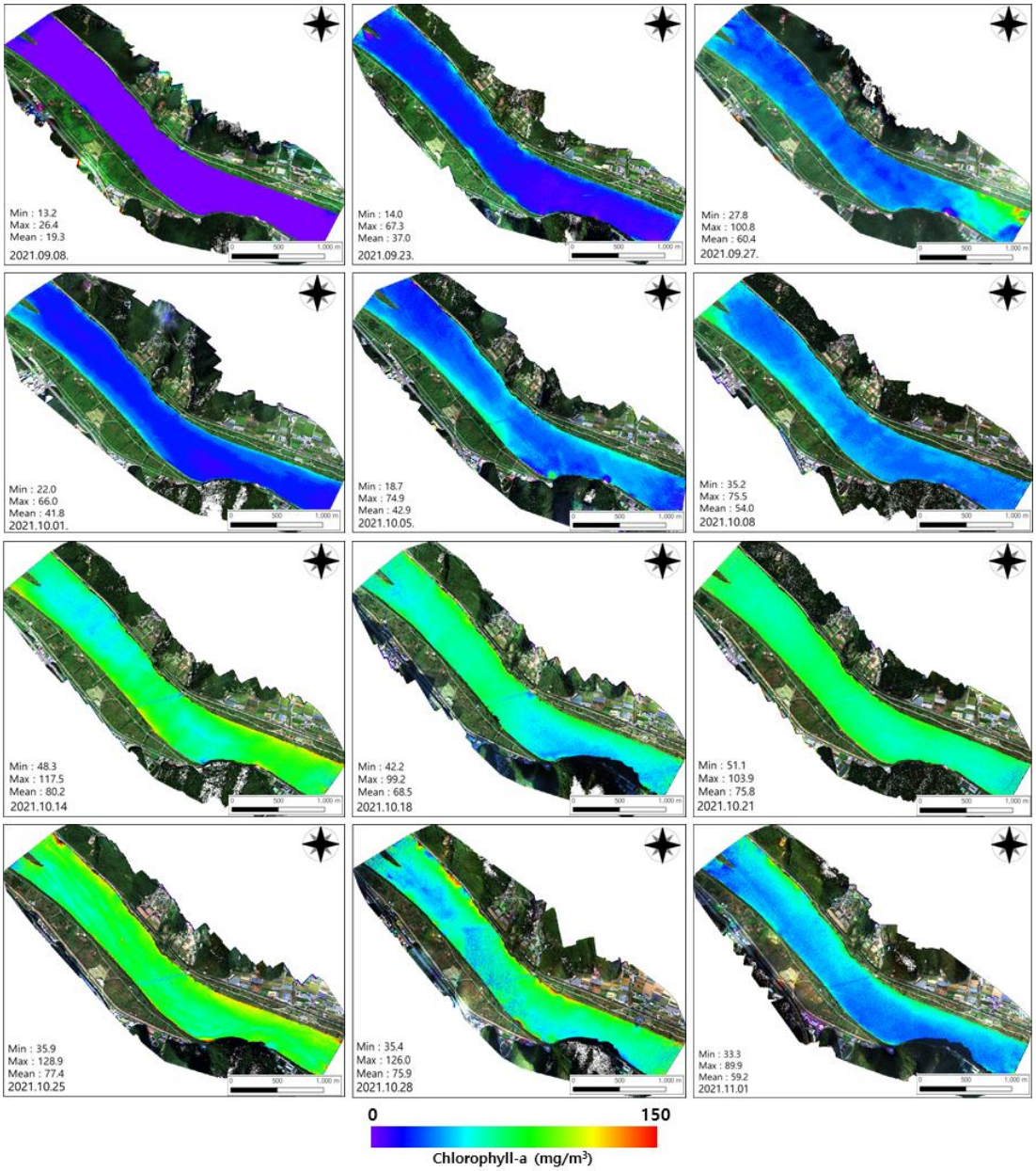

FIGURE 9. Distribution map of algal bloom(From September 8, 2021 to November 1, 2021)

년 8월 19일까지 유지되었고 이후 집중호우로 인하여 Chl-a 평균 농도는 큰 폭으로 감소하여 2021년 08월 30일 평균 Chl-a 농도는 14.9mg/m³으로 가장 낮은 농도를 나타냈다. 9월과 10월에는 강수량의 감소와 이에 따른 일조시간의 증가로 평균 Chl-a 농도는 지속적으로 증가하여 높은 Chl-a 농도를 보였다.

육안으로 녹조의 발생이 관측 가능하고 Chl-a 농도가 높은 2021년 08월 05일과 2021년 08월 19일 영상의 Chl-a 공간적 분포를 분석하

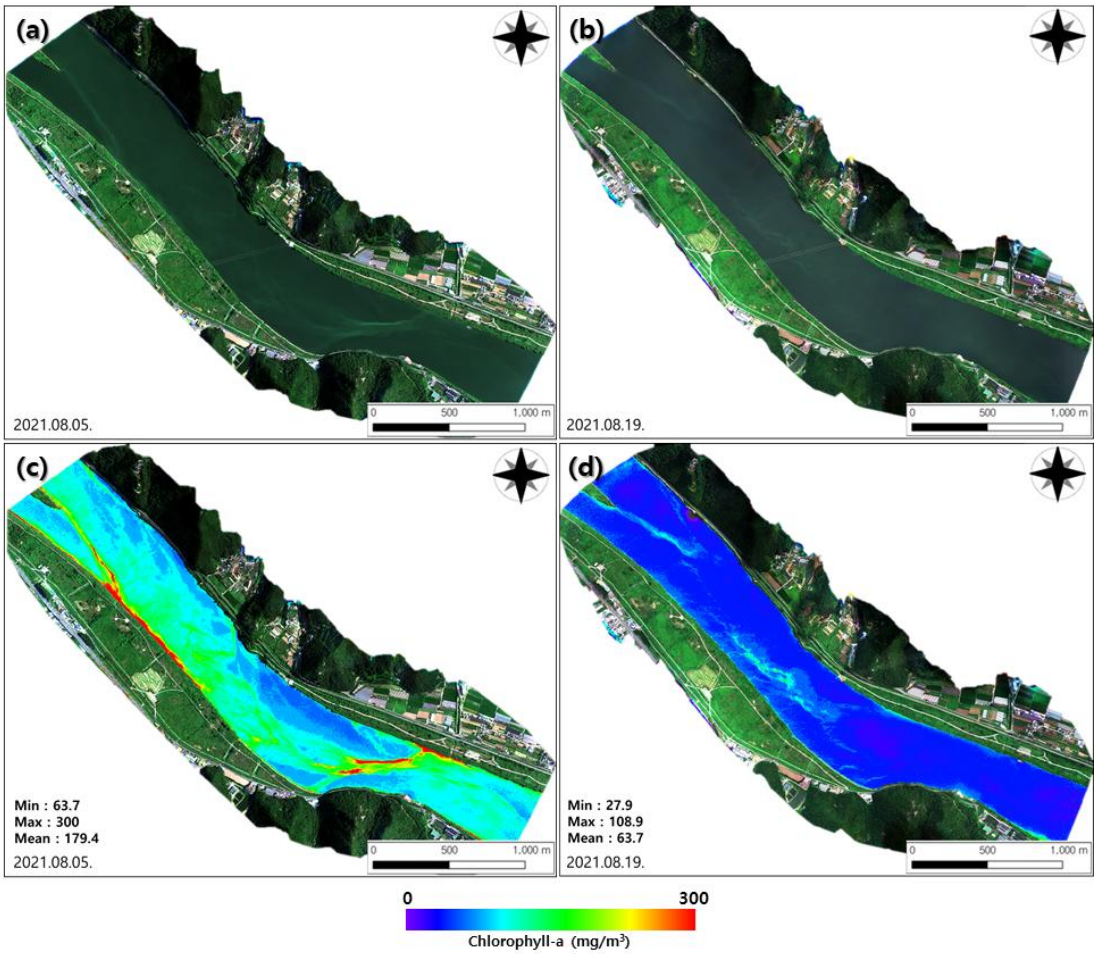

FIGURE 10. (a) RGB composite image of August 5, 2021, (b) RGB composite image of August 19, 2021, (c) Chl-a distribution of August 5, 2021, (d) Chl-a distribution of August 19, 2021

였다. 2021년 08월 05일 RGB 합성영상에서 하천 상류 지점과 하천 곡류부에서 조류의 응집으로 인한 녹조 현상을 확인하였고, 해당 다중분광영상에 MCI를 적용하여 Chl-a 추정 결과 63.7mg/㎥~300mg/㎥범위로 평균 179.4mg/㎥으로 연구기간 동안 취득된 자료 중 가장 높은 Chl-a 농도를 나타냈으며 이는 RGB 합성영상에서 관측되는 녹조의 분포(그림 10a)와 MCI를 적용한 Chl-a 농도 분포(그림 10c)가 매우 유사한 형태를 보였다.

2021년 08월 19일 RGB 합성영상은 2021년 08월 05일에 비해 상대적으로 옅은 조류의 응집을 보였다(그림 10b). MCI를 적용하여 Chl-a 추정 결과 27.9~108.9mg/㎥ 범위로 평균 63.7mg/㎥으로 나타났다. RGB 합성영상에서 관측되는 녹조의 분포와 MCI를 적용한 Chl-a의 분포가 동일한 형태를 보였으며(그림 10d), 2021년 08월 05일에 비해 녹조 현상이 완화된 것으로 나타났다.

하천 양안은 낮은 수심으로 유속이 느리고 이로 인해 물의 잔류시간이 증가하여 조류의 응집으로 Chl-a 농도가 높게 나타난다. 이와 반해

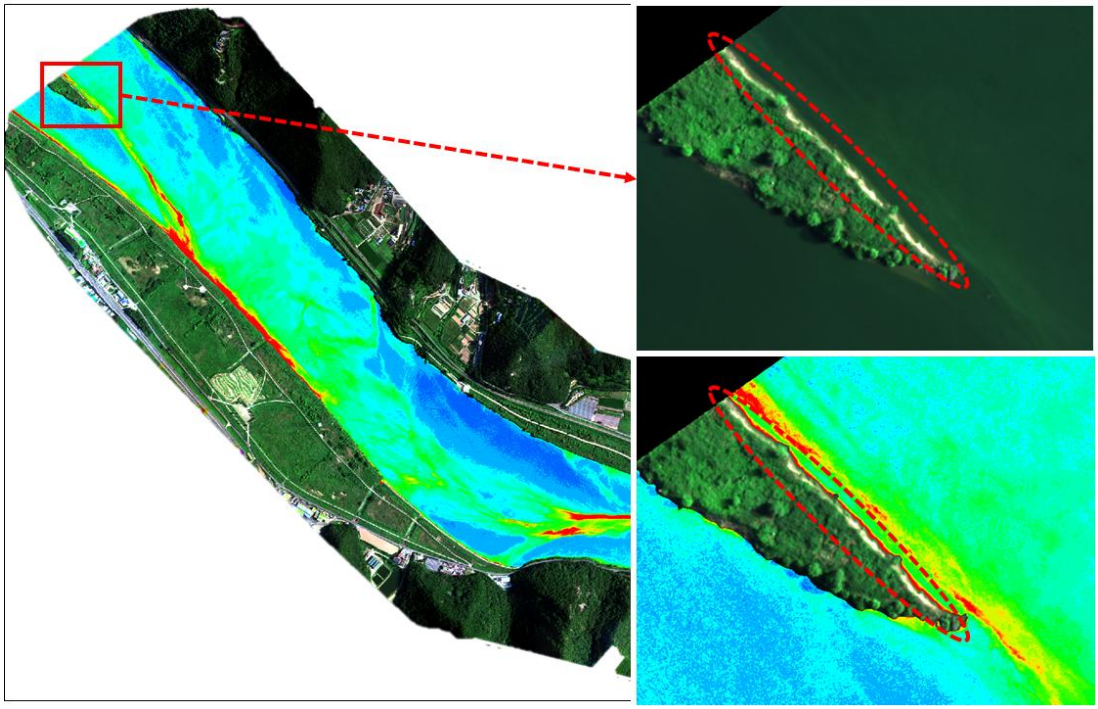

FIGURE 11. Cases where Chl-a is overestimated due to low water depth

하천의 중앙은 물의 흐름이 원활하여 상대적으로 조류의 응집이 낮으며 낮은 Chl-a 농도를 보인다. 따라서 하천 중심부와 양안의 조류의 농도가 다르게 나타난다. 물금·매리 구간에서는 하천 상류의 우안과 하류의 좌안에서 높은 Chl-a 농도를 보였고 하천의 중심부는 비교적 낮은 Chl-a 농도를 보였다. 또한 하천 양안의 수생식물이나 인공 구조물을 녹조로 평가하여 높은 Chl-a 농도를 보이는 오류가 나타날 수 있다. 본 연구에서는 Green NDWI를 이용하여 하천 양안의 수생식물과 인공 구조물로 인한 오차는 발생하지 않았다. 그러나 하천의 낮은 수심으로 하상(강바닥)이 보이는 지역에서는 일부 높은 Chl-a 농도로 산출되었다(그림 11). 이는 Green NDWI 적용 시 Green, NIR 파장대에서 수체의 반사패턴을 보이나 하상이 비침으로 인해 Red, Red-edge 파장대에 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 녹조발생지수(Algal Bloom Indices) 개발

MCI 분광지수를 이용하여 작성한 Chl-a 기반의 녹조 분포지도로부터 녹조발생지수(Algal Bloom Indices)를 개발하고자 녹조의 강도, 범위, 발생 기간 등의 공간 분석 정보를 산출하였다. 녹조의 발생 강도 및 범위는 2016년 개정

TABLE 5. Comparison of criteria of algal bloom warning system

Item		Before revision	After revision
Indicator		Chl-a + Cyanobacteria	Cyanobacteria
Criteria	Watch	Chl-a 15mg/㎥ + Cyanobacteria 500cells/mL	Cyanobacteria 1,000cells/mL
	Warning	Chl-a 25mg/㎥ + Cyanobacteria 5,000cells/mL	Cyanobacteria 10,000cells/mL
	Algal bloom	Chl-a 100mg/㎥ + Cyanobacteria 1,000,000cells/mL	Cyanobacteria 1,000,000cells/mL

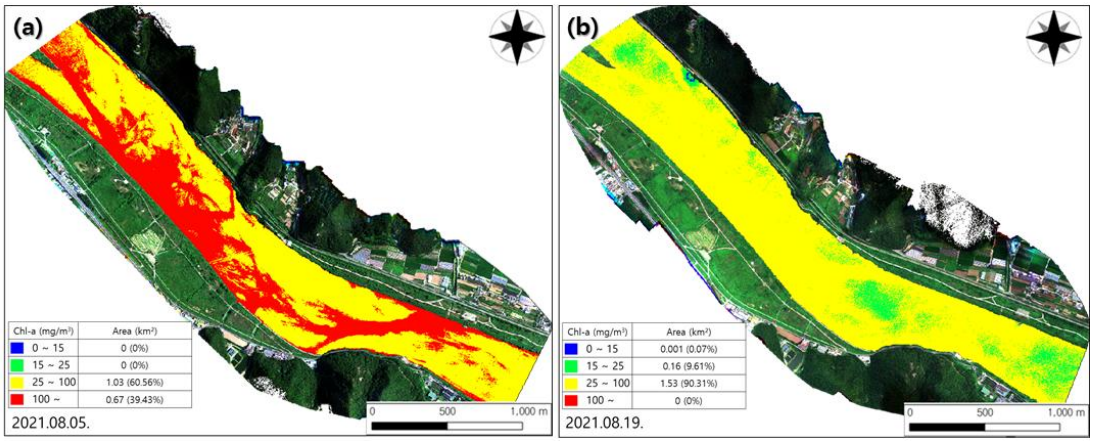

FIGURE 12. Algal bloom distribution according to the algal bloom warning system

전 조류예보제(현 조류경보제)의 기준값으로 Chl-a 농도에 따른 등급을 부여하고 해당 등급이 차지하는 면적으로 산출하였다. 2016년 개정 전·후의 조류경보제 발령 기준은 표 5와 같다. 현행 조류경보제는 남조류 세포수 단일 지표를 기준으로 운영하고 있고, 개정 전 조류경보제의 경보 지표로써 Chl-a 농도와 남조류 세포수를 이용하였다. 본 연구에서는 녹조분포 파악을 위하여 Chl-a 농도를 추정하였으므로, 개정 전 조류경보제를 이용하여 Chl-a 농도에 따른 조류경보제 등급을 부여하였다. 녹조발생지수는 Chl-a 농도가 높은 2021년 08월 05일, 2021년 08월 19일 영상에 대하여 적용하였다.

2021년 08월 05일 녹조 분포지도의 Chl-a 평균이 179.4mg/㎥으로 가장 높은 Chl-a 농도가 관측되었고 당시 다중분광영상으로 촬영된 수계 면적은 1.7㎢이다. 녹조 분포지도에 조류경보제 적용을 통한 발령기준에 따른 면적 산출 결과 하천 전 구간 경계(Warning) 이상을 차지하였으며, 녹조 현상이 관측되는 구간을 포함한 일부 구간이 대발생(Algal bloom)으로 나타났다(그림 12a). 경계(Warning) 면적은 1.03㎢로 하천 면적의 60.56%를 차지하였고, 대발생(Algal bloom) 면적은 0.67㎢로 39.43%를 차지하였다.

2021년 08월 19일 녹조 분포지도의 Chl-a 평균은 63.7mg/㎥으로 Chl-a 농도가 높은 편이었고 당시 다중분광영상으로 촬영된 수계 면적은 1.691㎢이다. 녹조분포지도에 조류경보제 적용을 통한 발령기준에 따른 면적 산출 결과 일부 구간에서 조류경보제 발령 기준 중 보통(Chl-a 15mg/㎥ 이하) 및 관심(Watch)을 보였으며 하천 전 구간 경계(Warning)로 나타났다(그림 12b). 보통 면적은 0.001㎢로 하천 면적의 0.07%를 차지하며 매우 적은 면적을 보였으며, 관심(Watch) 면적은 0.16㎢로 하천 면적의 9.61%로 나타났다. 경계(Warning)의 면적은 1.53㎢로 하천 면적의 90.31%를 차지하여 가장 넓은 면적으로 나타났다.

2016년 개정 전 조류경보제 발령기준을 이용하여 물금·매리 구간의 녹조 발생 빈도 및 공간적 분포를 확인하고자 "경계" (Chl-a 25mg/㎥ 이상)에 해당하는 지역의 발생 일수를 계산하여 지도화하였다. 2021년 07월 01일부터 2021년 11월 01일까지 하천 전 구간에서 "경계" 이상의 Chl-a 농도가 관측되었으며 최소 12회에서 최대 19회까지 "경계" 이상의 Chl-a 농도가 관측되었다(그림 13). 하천의 중앙에서 "경계" 수준의 발생 빈도가 낮은 반면 하천의 양안에서는 발생 빈도가 높게 나타났다.

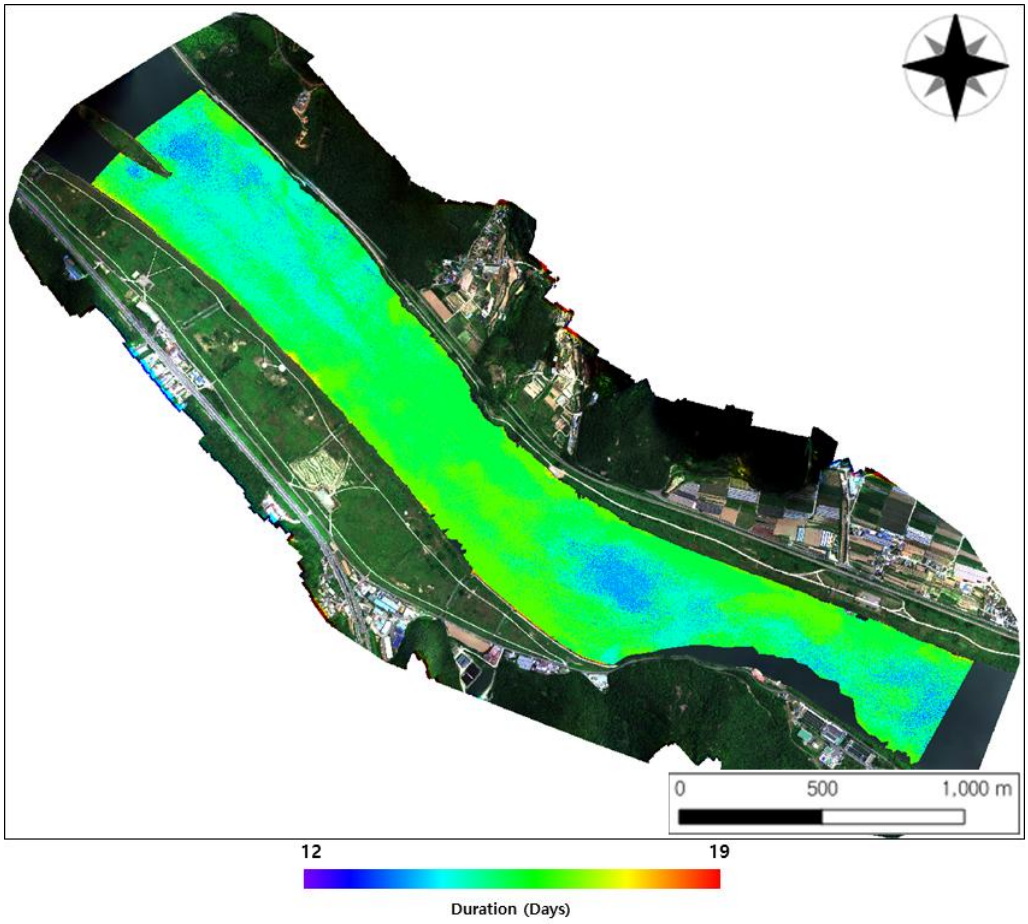

FIGURE 13. Frequency of exceeding "warning" by algal bloom warning system

결 론

본 연구는 지점 단위의 현장 채수 방식에 의한 녹조 모니터링을 보완하기 위하여 무인항공기 및 다중분광센서를 이용하여 지도 형태의 녹조 관측을 수행하고, 다중시기 녹조 분포지도로부터 녹조발생지수를 산출하였다.

낙동강 하류 중 조류 우심구간인 물금·매리지점 및 취수장까지의 3㎞ 범위에서 2021년 07월 01일부터 11월 01일까지 무인항공촬영은 21회, 현장 채수는 7회 수행하여 자료를 축적하였다. 다중분광영상의 반사도값을 NDCI, 3BR, MCI 분광지수로 변환하여 Chl-a 실측값과의 상관 분석한 결과 MCI가 Chl-a 농도 추정에 가장 높은 통계적 유의성(R^2=0.91, RMSE=8.1mg/㎥)을 보였다. MCI를 이용하여 산출한 Chl-a 농도 추정식을 촬영 구간 내의 수계영역에 대한 Chl-a 농도 계산, 녹조 분포지도 작성 및 녹조 분포 현황 파악에 적용하였을 때 실측자료 및 현장조사에 의한 자료와 유사한 경향의 결과를 나타내었다.

이러한 결과로부터 무인항공기를 이용한 하천 관측으로 비교적 넓은 수역에서 수표면 전체에 대해 정량적인 녹조 정보와 공간적인 분포를 나타낼 수 있어 녹조 모니터링의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 다중분광영상을 활용하여 영상분석 및 지도화 작업에 드는 시간

과 인력을 단축하여 초분광영상이나 항공영상에 비해 비교적 빠르게 분석을 수행할 수 있어 준실시간 모니터링도 가능하여 활용도가 높을 것으로 보인다.

또한, 녹조 분포지도로부터 녹조의 강도, 범위, 발생 기간 등의 공간정보를 산출하여 녹조 발생지수로 정의했는데, 녹조의 발생 강도 및 범위는 Chl-a 분포에 대하여 2016년 개정 전 조류경보제의 Chl-a 농도 기준으로 등급을 부여, 해당 등급이 차지하는 면적을 산출하였다. 조류경보제 등급 중 경계(Warning) 이상에 해당하는 지역의 발생 일수를 계산하여 지도화하였다. 이러한 자료로 지점 단위의 텍스트 정보만 제공되는 현행의 조류경보제 자료에 공간분석 정보를 보완하여 녹조 분포에 대한 이해도를 높일 수 있을 것으로 보인다. 이후 지속적인 자료 수집을 통해 연간 녹조 발생의 강도 및 발생 빈도의 공간적 변화로부터 조류 우심 구간을 정량적으로 파악하여 녹조의 공간정보 기반 하천 관리에 활용할 수 있을 것으로 사료된다. KAGIS

REFERENCES

Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. and Paluikof, J.P. 2008. Climate change and water. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat. 70pp.

Binding, C.E., Greenberg, T.A. and Bukata, R.P. 2013. The MERIS maximum chlorophyll index; its merits and limitations for inland water algal bloom monitoring. Journal of Great Lakes Research. 39:100-107.

Byeon, Y.G., Seo, M.J., jin, D.H., Jung, D.S., Woo, J.H., Jeon, W.J. and Han, K.S. 2021. Green algae detection in the middle · downstream of Nakdong river using high-resolution satellite data. Korean Journal of Remote Sensing. 37(3):493-502 (변유경, 서민지, 진동현, 정대성, 우종호, 전우진, 한경수. 2021. 고해상도 위성영상을 활용한 낙동강 녹조탐지기법 비교 및 분석. 대한원격탐사학회지 37(3):493-502).

Cho, H.G. and Lee, K.S. 2014. Comparison between hyperspectral and multispectral images for the classification of coniferous species. Korean Journal of Remote Sensing. 30(1):25-36 (조형갑, 이규성. 2014. 침엽수종 분류를 위한 초분광영상과 다중분광영상의 비교. 대한원격탐사학회지 30(1):25-36).

Choe, E.Y., Jung, K.M., Yoon, J.S., Jang, J.H., Kim M.J. and Lee, H.J. 2021. Application of spectral indices to drone-based multispectral remote sensing for algal bloom monitoring in the river. Korean Journal of Remote Sensing. 27(5):613-623 (최은영, 정경미, 윤종수, 장정희, 김미정, 이호중. 2021. 하천 녹조 모니터링을 위한 드론 다중분광영상의 분광지수 적용성 평가. 대한원격탐사학회지 27(5):613-623).

Dall'Olmo, G., Gitelson, A. A. and Rundquist, D. C. 2003. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. Geophysical Research Letters. 30(18):1938-1941.

Ha, N. T. T., Thao, N. T. P., Koike, K. and Nhuan, M. T. 2017. Selecting the best band ratio to estimate chlorophyll-a concentration in a tropical freshwater lake using sentinel 2A images from a case study of lake Ba Be (Northern Vietnam). ISPRS International Journal of Geo-Information. 6(9):290.

Jang, S.W., Kim, D.H., Chung, Y.H. and Yoon, H.H. 2015. A study on exploring accumulation zone and composition investigation of floating debris in Nakdong river basin. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. 18(2):45-58 (장선

웅, 김대현, 정용현, 윤홍주. 2015. 낙동강 유역 부유쓰레기의 집적 구간 탐색 및 성상 조사 연구. 한국지리정보학회지 18(2):45-58).

Kim, E., Nam, S.H., Koo, J.W. and Hwang, T.M. 2021. Hybrid approach utilizing unmanned aerial vehicle and unmanned surface vehicle to assess the map of chlorophyll-a in a stream. Preprints 2021, 2021010368.

Kim, H.M., Jang, S.W. and Yoon, H.J. 2017. Utilization of unmanned aerial vehicle(UAV) image for detection of algal bloom in Nakdong river. Journal of Korea Institute of Electronics Communication Sciences. 12: 457-463 (김흥민, 장선웅, 윤홍주. 2017. 무인항공영상을 활용한 낙동강 녹조 탐지. 한국전자통신학회 논문지 12:457-463).

Kim, S.H., Moon, B.H., Song, B.G. and Park, K.H. 2019. An analysis on the usability of unmanned aerial vehicle image to identify water quality characteristics in agricultural streams. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. 22(3):10-20 (김성현, 문병현, 송봉근, 박경훈. 2019. 농업지역 소하천의 수질 특성 파악을 위한 UAV 영상 활용 가능성 분석. 한국지리정보학회지 22(3):10-20).

Kim, T.W., Shin, H.S. and Suh, Y.C. 2014. Airborne hyperspectral imagery availability to estimate inland water quality parameter. Korean Journal of Remote Sensing. 30(1): 61-73 (김태우, 신한섭, 서용철. 2014. 수질 매개변수 추정에 있어서 항공 초분광영상의 가용성 고찰. 대한원격탐사학회지 30(1):61-73).

Lee, K.H. and Lee, S.H. 2012. Monitoring of floating green algae using ocean color satellite remote sensing. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. 15(3):137-147 (이권호, 이소현. 2012. 해색위성 원격탐사를 이용한 부유성 녹조 모니터링. 한국지리정보학회지 15(3):137-147).

Ministry of Environment. 2021. 2020 Annual report of algae(green tide) occurrence and response. pp.40-46 (환경부. 2021. 2020년 조류(녹조)발생과 대응 연차보고서. pp.40-46).

Mishra, S. and Mishra, D. R. 2012. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sensing of Environment. 117:394-406.

Park, H.G. 2014. The occurrences and reduction measures of algal bloom. Bulletin of Korea Environmental Preservation Association. pp.17-21 (박혜경. 2014. 녹조의 발생원인과 저감대책. 환경정보 pp.17-21).

Park, J.I., Choi, S.Y. and Park, M.H. 2017. A study on green algae monitoring in watershed using fixed wing UAV. Journal of korean Institute of Intelligent System. 27(2):164-169 (박정일, 최승영, 박민호. 2017. 고정익 무인비행기를 이용한 수계 내 녹조 모니터링 연구. 한국지능시스템학회 논문지 27(2):164-169).

Park, Y.J., Jang H.J., Kim, Y.S., Baik, K.H. and Lee, H.S. 2014. A research on the applicability of water quality analysis using the hyperspectral sensor. Journal of the Korean Society for Environmental Analysis. 17(3):113-125 (박연정, 장현지, 김윤석, 백경희, 이희숙. 2014. 초분광센서를 이용한 수질 분석의 적용성에 관한 연구. 한국환경분석학회지 17(3):113-125).

Srivastava, A., Ahn, C. Y., Asthana, R. K., Lee, H. G. and Oh, H. M. 2015. Status, alert system, and prediction of cyanobacterial bloom in South Korea. BioMed research international. 2015:584-696.

Su, T. C. and Chou, H. T. 2015. Application of multispectral sensors carried on unmanned aerial vehicle(UAV) to trophic state mapping of small reservoirs: A case study of Tain-Pu reservoir in Kinmen. Taiwan. Remote Sensing. 7(8):10078-10097.

Thackeray, S. J., Jones, I. D. and Maberly, S. C. 2008. Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: species-specific responses to nutrient enrichment and climatic change. Journal of Ecology. 96(3):523-535. KAGIS