

Sentinel-2 위성영상을 활용한 안동호 녹조 분포 분석

정윤희, 문애경, 이해동, 손승우*

ETRI, *University of Massachusetts Lowell

tkwvvx@etri.re.kr, akmoon@etri.re.kr, haenamu@etri.re.kr, *seungwoo_son@uml.edu

Analysis of Algal Bloom in Andong Reservoir Using Sentinel-2 Satellite Image

Jeong Yun Hee, Moon Ae Kyeung, Lee Hae Dong, Son Seung Woo*

Electronics and Telecommunications Research Institute., *University of Massachusetts Lowell

요약

최근 기후변화에 따른 수온의 상승과 강우 패턴 변화는 내륙 수체의 부영양화를 가속화하여 녹조 발생을 증가시키고 있다. 이에 본 연구는 Sentinel-2 위성의 다중분광 영상을 통해 안동호의 녹조 발생 양상을 시·공간적으로 분석한다. 5일 간격으로 측정된 영상에 대해 NDCI와 FAI 지수를 복합적으로 활용하여 위성 영상이 내륙 수체의 광역적 모니터링에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 향후 다중 위성 자료 및 현장 데이터와의 통합을 통해 실시간 수질 예측 및 관리 시스템 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서 론

지구온난화로 인한 기후변화가 가속되면서 수환경 전반에 부정적 영향을 미치고 있다. 특히 수온 상승과 강우 패턴의 변화는 하천과 호수의 부영양화를 촉진하여 남조류의 이상 증식을 유발한다[1]. 이로 인해 발생하는 녹조는 수질 악화뿐만 아니라 독성 물질을 생성하여 생태계에 인체 건강에 위협이 된다[2]. 최근 우리나라에서도 낙동강, 금강 등 주요 수계에서 녹조 발생이 반복적으로 보고되고 있으며, 그 범위가 매년 확대되고 있다.

이러한 녹조 확산에 대응하기 위해 환경부에서는 전국 주요 수계에 수질측정망을 구축하고 정기적인 모니터링을 수행하고 있으나, 현장 채수 기반의 관측은 지점 중심의 한정된 공간 정보만 제공하므로 광범위한 수체 변화를 포괄적으로 파악하기에는 한계가 있다. 또한, 시료 채취와 분석에 긴 시간이 소요되어 급격한 수질 변화나 단기간 내의 녹조 확산에 즉각 대응하기 어렵다는 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 인공위성 기반 원격탐사 기법이 주목받고 있다[3].

특히 유럽우주국(ESA)의 Sentinel-2 위성은 10~20 m 공간 해상도와 10일의 재방문 주기를 가지며, Red-Edge 대역의 밴드를 포함한 다중분광 데이터를 제공한다. 이러한 특성은 내륙 수체의 엽록소-a 농도, 탁도, 부유 조류 분포 등을 정량적으로 추정하는데 적합하다[3]. 또한 넓은 지역을 주기적으로 관측할 수 있어 수체의 시·공간적 변화를 연속적으로 모니터링할 수 있다. 그러나 단일 지수 기반의 분석은 계절적·기상적 요인에 따른 광학적 변동성을 충분히 반영하기 어렵다[4]. 이에 본 연구는 NDCI(Normalized Difference Chlorophyll Index)와 FAI(Floating Algae Index) 등을 결합하여 안동호의 조류 분포 특성을 시·공간적으로 분석하고, Sentinel-2 영상의 내륙 수질 모니터링 활용 가능성을 평가하고자 한다.

안동호는 낙동강 상류 수계에 있는 인공호로, 최근 여름철 녹조 발생이 빈번해지고 있어, 위성 기반 분석을 통해 수질 변화의 공간적 분포와 시기적 변동을 정량화할 필요가 있다. 본 연구는 향후 수질 예측 시스템 구축 등의 기초 자료로 활용하는 것을 목표로 한다.

II. 본론

2.1 연구 지역

본 연구의 대상 지역은 경상북도 안동시에 위치한 안동호(36.584201° , 128.778269°)로, 저수면적은 약 51.5 km^2 이다. 호수 상류에 소재한 약 50개의 휴·폐광산으로부터 발생한 오염물질이 안동호로 유입되고 있으며, 동시에 비점오염 물질도 혼합되는 특성을 가진다. 수심이 깊고 유입하천이 다수 존재해 정체수역과 혼합수역이 공존하는 구조적 특성을 가진다. 이러한 특성은 수온 성층화와 조류 발생의 공간적 차이를 유발하는 주요 요인이다.

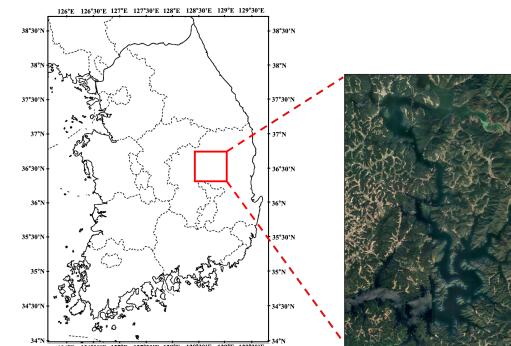


그림 1. 경상북도 안동시의 안동호 위치

2.2 위성 영상 자료

본 연구에서는 ESA에서 제공하는 Sentinel-2 MSI(Multi-Spectral Instrument) 2A(S2A)와 2B(S2B)를 결합한 영상을 활용한다. 단일 위성만 활용했을 경우 10일의 관측 주기를 가지지만, 이를 결합할 시 5일 간격으로 축소하여 관측할 수 있다. 분석 기간은 2019년 1월부터 2025년 10월까지로 약 7년 간의 영상을 분석한다. 모든 영상은 NDWI(Normalized Difference Water Index)를 적용하여 수체 영역을 추출하고, SCL(Scene Classification Layer) 마스킹으로 구름, 박무 등의 영향을 최소화한다. Sentinel-2 영상에서 반사율 값을 추출하여 NDCI[5]와 FAI[6]를 산출한다. 이때, NDCI는 Red(665 μm) 및 Red-Edge(705 μm) 밴드를 이용해 계산하며, 이는 수중 클로로필-a 농도 변화를 반영하는 지수이다[5]. FAI는 Red-NIR(Near-Infrared Spectrometer)-SWIR(Short Wavelength Infrared)(665, 865, 1610 μm) 밴드 간의 선형 보정을 기반으로 수행한다. 이러한 지수는 부유 조류의 높은 반사도 특성을 강조하며, 대기 보정 오차에 강

표 1. 안동호의 연도별·계절별 NDCI 및 FAI 평균값 (2019-2025)

	봄 (3-5월)		여름 (6-8월)		가을 (9-11월)		겨울 (12-3월)	
	NDCI	FAI	NDCI	FAI	NDCI	FAI	NDCI	FAI
2019	0.025±0.109	-0.000±0.004	0.122±0.124	-0.004±0.014	0.068±0.137	-0.002±0.005	-0.009±0.098	0.001±0.004
2020	0.020±0.110	-0.002±0.005	0.085±0.194	-0.002±0.009	0.030±0.176	-0.007±0.010	-0.050±0.077	-0.002±0.003
2021	0.014±0.061	-0.003±0.008	0.115±0.062	-0.000±0.016	0.120±0.145	0.001±0.015	-0.019±0.126	-0.001±0.002
2022	0.032±0.122	-0.004±0.007	0.175±0.177	-0.012±0.014	0.010±0.149	-0.003±0.005	-0.044±0.226	-0.002±0.005
2023	-0.018±0.138	-0.012±0.010	0.106±0.118	-0.031±0.021	0.056±0.134	-0.004±0.009	-0.044±0.080	-0.007±0.004
2024	-0.026±0.047	-0.003±0.005	0.109±0.097	-0.012±0.015	0.080±0.178	-0.008±0.010	-0.082±0.216	-0.002±0.002
2025	0.013±0.188	-0.005±0.011	0.111±0.294	-0.013±0.011	0.253±0.027	-0.011±0.002	-0.088±0.195	-0.001±0.003

전하여 수면 부유 낭조류의 모니터링에 적합하다[6]. 이때 모든 지수의 연산은 Google Earth Engine을 활용해서 수행한다.

2.3 조류 분포 시작화

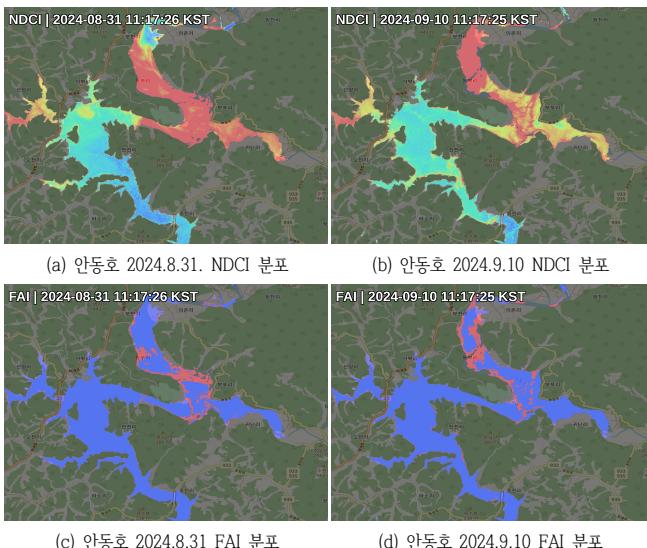


그림 2. 시간에 따른 안동호 NDCI 및 FAI 공간적 분포 비교

그림 2(a)~(d)는 2024년 8월 31일과 9월 10일의 NDCI 및 FAI 공간 분포를 보여준다. 8월 말에는 NDCI 값이 안동호 중·상류 전역에서 높게 나타났으나, FAI는 일부 수역에서만 양성 반응을 보였다. 이는 조류가 수중에는 많지만 수면으로 부상한 녹조 매트는 제한적임을 시사한다. 반면, 9월 10일 영상에서는 NDCI 고농도 구역이 상류로 이동하면서 분포 패턴이 변화하였고, FAI 양성은 극히 일부 지역에서만 관찰되었다. 이는 기상 조건 변화나 수온 하강에 따라 조류의 공간 분포 및 부상 특성이 달라졌음을 나타낸다. 따라서 NDCI와 FAI의 조화를 통해 조류의 수직 분포와 부상 정도를 추적해 볼 수 있음을 의미한다.

표 1은 2019년부터 2025년까지 안동호의 계절별 NDCI 및 FAI 평균값을 나타낸다. 2022년 여름 NDCI가 0.175 ± 0.177 로 최고치를 기록하였으며, 2021년 가을에도 0.120 ± 0.145 로 높게 유지되어 조류 성장기가 연장되는 양상을 보였다. 반면 FAI는 대부분 기간에서 $-0.013\sim-0.001$ 범위로 낮게 유지되어 표면 매트 형성이 제한적이었다. 이는 수중 조류 농도와 표면 부상이 독립적으로 발생할 수 있음을 시사한다.

III. 결론

본 연구에서는 Sentinel-2 위성 영상을 활용하여 안동호의 녹조 분포 변화를 분석하였다. NDCI와 FAI를 복합적으로 활용한 결과, 수중 엽록소 증가와 표면 부상 매트 형성으로 이어지는 단계적 변화를 식별할 수 있음을 확인했다. Sentinel-2 영상은 높은 공간 해상도와 짧은 재방문 주기로 내륙 수체

모니터링에 유용하지만, 구름, 그림자, 연무 등의 영향으로 영상 품질이 저하될 수 있다. 또한 대기보정의 불완전성으로 인한 지수 계산 오차가 발생할 수 있으므로, 현장 엽록소-a 실측자료와의 교차 검증이 필요하다. 또한, 단일 위성 자료만을 사용했을 때, 관측 주기와 기상 조건에 따른 결측 영상이 발생할 수 있으므로 다중 위성 자료 간의 정합성 확보가 요구된다.

향후에는 다양한 관측 주기, 해상도, 센서 밴드를 제공하는 Landsat-8/9(NASA-SA), 천리안(한국) 등 다중 위성 자료와 안동호의 현장 센서 기반 수질 데이터를 결합하여, 녹조 예측 및 수질 모니터링 모델의 입력 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 안동 중소기업 ICT융합기술경쟁력강화사업[25AD1100]의 연구 결과로 수행되었음. [25ZD1110, 대경권 지역산업 기반 ICT 융합 기술 고도화 지원사업]

참 고 문 헌

- [1] O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., and Gobler, C. J. "The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change," Harmful Algae, 14, pp. 313–334, 2012.
- [2] Paerl, H. W., and Huisman, J. "Blooms Like It Hot," Science, 320, pp. 57–58, 2008.
- [3] Molkov, A. A., Fedorov, S. V., Pelevin, V. V., and Korchemkina, E. N. "Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery," Remote Sens., vol. 11, no. 16, pp. 1215, 2019.
- [4] Lee, S., Yu, J., Park, C., Cho, Y., and Jo, A. "Machine Learning-Based Chlorophyll-a Content Prediction Model Using Sentinel-2 Index Fusion and Assessment of River Water Algal Bloom Detection Capability," Korean Journal of Remote Sensing, The Korean Society of Remote Sensing, vol. 41, no. 2, pp. 311–326, 2025.
- [5] Mishra, S., and Mishra, D. R.. "Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters," Remote Sensing of Environment, Elsevier, 2012.
- [6] Hu, C. "A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans," Remote Sensing of Environment, 113(10), pp. 2118–2129, 2009.