



A study on the development of a Blue-green algae cell count estimation formula in Nakdong River downstream using hyperspectral sensors

Kim, Gwang Soo^a · Choi, Jae Yun^b · Nam, Su Han^c · Kim, Young Do^{d*} · Kwon, Jae Hyun^e

^aPh.D, Department of Civil & Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

^bMaster Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

^cPh.D, Department of Civil & Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

^dProfessor, Department of Civil & Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

^eProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Nakdong River Basin Environmental Research Center, Inje University, Gimhae, Korea

Paper number: 22-120

Received: 4 December 2022; Revised: 29 April 2023.; Accepted: 3 May 2023

Abstract

Due to abnormal climate phenomena and climate change in Korea, overgrowth of algae in rivers and reservoirs occurs frequently. Algae in rivers are classified into green algae, blue-green algae, diatom, and other types, and some species of blue-green algae cause problems due to odor and the discharge of toxic substances. In Korea, an algae alert system is in place, and it is issued based on the number of harmful blue-green algae cells. Thus, measuring harmful blue-green algal blooms is very important, and currently, the analysis method of algae involves taking field samples and determining the cell count of green algae, blue-green algae, and diatoms through algal microscopy, which takes a lot of time. Recently, the analysis of algae concentration through Phycocyanin, an alternative indicator for the number of harmful algae cells, has been conducted through remote sensing. However, research on the analysis of the number of blue-green algae cells is currently insufficient. In this study, we water samples for algal analyses were collected from river and counted the number of blue-green algae cells using algae microscopy. We also obtained the Phycocyanin concentration using an optical sensor and acquired algae spectra through a hyperspectral sensor. Based on this, we calculated the equation for estimating blue-green algae cell counts and estimated the number of blue-green algae cells.

Keywords: Blue-Green algae, Phycocyanin, Hyperspectral image, Cellcount

초분광센서를 활용한 낙동강 하류부 남조류세포수 추정식 개발에 관한 연구

김광수^a · 최재윤^b · 남수한^c · 김영도^{d*} · 권재현^e

^a명지대학교 토목환경공학과 박사과정, ^b인제대학교 건설환경공학부 석사과정, ^c명지대학교 토목환경공학과 박사과정,

^d명지대학교 토목환경공학과 교수, ^e인제대학교 건설환경공학부(낙동강유역환경연구센터) 교수

요 지

국내 이상기후현상과 기후변화로 인해 하천, 호소에 조류의 과대성장이 빈번히 발생하고 있다. 하천의 조류는 녹조류, 남조류, 규조류, 기타조류 등으로 분류되며, 남조류 중 일부 종은 악취 유발과 독성물질의 배출로 문제를 야기하고 있다. 국내에서는 조류경보제를 시행하고 있으며, 이는 유해 남조류세포수에 따라 발령이 된다. 이렇듯 유해남조류 측정은 매우 중요하며, 현재 조류의 분석방법은 현장샘플을 하여 조류검경을 통해 녹조류, 남조류, 규조류 중 유해남조류를 구분하여 세포수를 산정하기 때문에 시간이 많이 소요된다. 최근 원격탐사를 통해 남조류세포수의 대체 인자(지표)인 Phycocyanin을 통해 조류농도를 분석하고 있으나, 남조류세포수 분석에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 실제 하천에서 발생한 조류를 채취하여 조류검경을 통해 남조류세포수를 검경하였으며, 광학센서로 Phycocyanin농도, 초분광센서를 통해 조류스펙트럼을 취득하고, 이를 통해 남조류세포수 추정식을 산정하여 남조류세포수를 추정하였다.

핵심용어: 남조류, 피코시아닌, 초분광영상, 세포수

*Corresponding Author. Tel: +82-31-330-6407

E-mail: ydkim@mju.ac.kr (Kim, Young Do)

1. 서론

조류는 광합성을 통해 성장하며, 일사량, 수온, 영양염류, 체류시간 등 환경조건에 따라 큰 영향을 받는 수생태계 먹이사슬의 일차생산자로 수생태에서 중요한 역할을 수행한다 (ME, 2020). 하천의 조류는 크게 규조류, 녹조류, 남조류로 분류되며, 남조류 중 유해남조류(*microcystis*, *Anabaena* 등)가 과대증식하면서 녹조현상이 발생하게 된다. 유해남조류는 동물의 간을 손상시키는 독소를 만들어내며, 외국에서는 사람이 죽은 사례와 가축이 대량폐사 하는 사례도 있다(Kim, 2017a). 그리고 수돗물의 맛·냄새 유발, 정수장의 여과장치 기능 저하, 수체 내 산소고갈로 인한 어패류 질식사 등 다양한 문제를 일으킬 수 있다(Kim, 2017b). 국내 홍수제어를 위한 8개의 대규모 보 건설로 인해 하천 지형이 크게 변화함에 따라 수심, 유속, 체류시간과 같은 수리특성을 포함한 하천 환경이 바뀌면서 수질 특성도 큰 영향을 받았다(Jung and Kim, 2019). 이로인해 정체성 수역 특성을 나타냄과 동시에 수질환경적 변화가 녹조발생을 일으키고 있다(Jung *et al.*, 2021).

국내에서 녹조현상을 대비하기 위해 상수원 및 친수활동 구간에 유해남조류 세포수를 기준으로 하여 단계별로 조류 경보제를 시행하고 있으며, 이를 통해 국민의 안전을 도모하고 있다. 조류의 측정방법은 전자 입자 계수, 현미경 분석을 포함하여 조류 부피를 추정하는 방법이 다양하게 연구되었다 (Hillebrand *et al.*, 1999). 일반적으로 조류 세포수를 측정하기 위해 현장에서 시료를 채취한 후 실험실 기반 현미경 분석을 통해 우점종과 조류 종 별 세포수를 측정할 수 있다(Montagnes *et al.*, 1994). 이러한 실내 분석은 조류 현황에 대한 정량적·정성적 분석이 가능하며, 이는 녹조현상에 대한 기초자료로 활용되고 있다. 하지만, 녹조현상은 하천에서 넓은 범위로 발생하는데 기존 점 단위 현장샘플 조사의 경우 하천의 전반적인 공간적 분포를 파악하는데에 한계가 있다(Kim *et al.*, 2017). 또한 현미경을 통한 직접계수 방법의 경우 시간, 비용, 인력이 많이 소요된다. 분광광도계는 광학밀도를 이용해 광합성을 하는 모든 조류가 가지고 있는 Chlorophyll-a 농도를 측정할 수 있다(Kim *et al.*, 2003). 현미경을 통한 직접 계수법에 비해 분석시간을 단축할 수 있지만, 실시간 데이터 측정에는 어렵다(Shin *et al.*, 2015). 분광광도계를 이용할 경우 수 시간 동안 지속적으로 시료를 측정해야 하기 때문에, 측정 시간과 노동력 소모가 클 뿐 아니라, 플록의 상태를 실시간으로 확인 할 수 없는 단점을 가지고 있다(Seo *et al.*, 2016). 이런 한계를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 위성영상을 활용하여 남조류 개체수 및 남조류 생체량 추정 모델링을 통해 남조류

세포수 추정연구(Back *et al.*, 2016), 드론 다중분광영상을 이용한 분광지수 적용성평가(Choe *et al.*, 2021) 등 조류의 흡수 특성 변화를 일으키는 매개변수를 이용하여 녹조류 고유 색소인 Chlorophyll-a, 남조류 고유 색소인 Phycocyanin을 대체인자로 분석중이지만, 남조류세포수 추정에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서 이런 단점을 보완하기 위해 남조류 세포수와 광학센서를 통해 Phycocyanin 농도를 측정하고 초분광센서 조류측정 정확도를 개선하기 위해 초분광데이터를 활용하여 Phycocyanin 농도와 남조류세포수 추정연구를 진행하였다.

2. 실험방법

2.1 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 낙동강의 지류인 대포천으로 선정하였다(Fig. 1). 이 지역은 물금취수장과 원동취수장 사이에 위치해 있다. 조류는 체류시간이 증가함에 따라 성장에 큰 영향을 미치는데, 본 연구의 대상지역은 지류에 비해 상대적으로 본류의 유량이 크고 유속이 작아져 정체현상이 나타나며, 조류가 빈번하게 발생하는 구간이다.

2.2 조류 측정 방법

남조류 측정은 낙동강에 조류의 과대성장하는 시기인 7~8월 사이에 총 10일 측정을 진행하였다. 동일시료를 이용하여 형광센서데이터, 초분광데이터, 남조류세포수의 비교분석을 하기 위해 교량위에서 우안, 중앙, 좌안 3지점에서 반도채

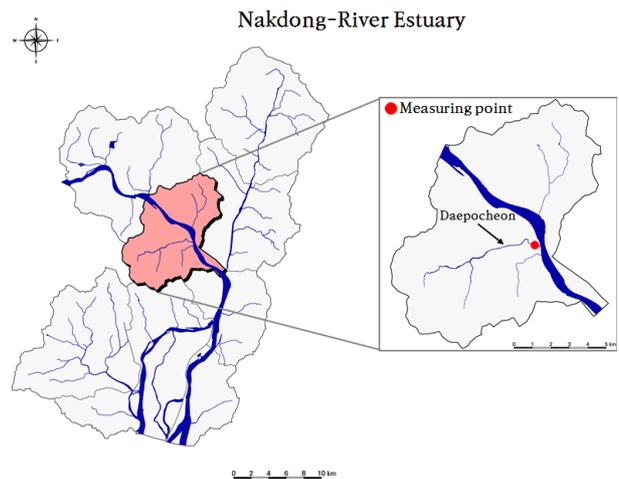


Fig. 1. Study area

Table 1. Measurement data

Date	Measuring point	Measurement item
2022.07.06	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin
	middle bank	
	Left bank	
2022.07.07	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin
	middle bank	
	Left bank	
2022.07.12	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin
	middle bank	
	Left bank	
2022.07.13	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin
	middle bank	
	Left bank	
2022.07.28	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin
	middle bank	
	Left bank	
2022.08.08	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin, hyperspectral
	middle bank	
	Left bank	
2022.08.09	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin, hyperspectral
	middle bank	
	Left bank	
2022.08.10	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin, hyperspectral
	middle bank	
	Left bank	
2022.08.12	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin
	middle bank	
	Left bank	
2022.08.15	Right bank	Algae cell count, Phycocyanin
	middle bank	
	Left bank	

수기를 통해 현장시료를 채수하였다. 채수한 시료로부터 형광센서로 Phycocyanin 농도를 측정 후, 실내에서 현미경으로 조류우점종과 남조류세포수를 측정하였다. 초분광데이터의 경우 8월에 채수한 동일시료를 이용하여 데이터를 수집하였다(Table 1).

2.3 형광센서 측정 방법

본 연구에서 사용된 형광센서는 Sequia Scientific사의 LISST-HAB Sensor를 사용하였다(Fig. 2). 이 센서는 Chlorophyll 0-500 ppb, Phycocyanin 0-4,500 ppb, Phycoerythrin 0-750 ppb 농도 범위에서 측정이 가능하다. 하천에서 주로 성



Fig. 2. LISST-HAB sensor



Fig. 3. LISST-HAB sensor measurement

장하는 조류의 종류는 크게 녹조류, 남조류, 규조류로 나뉘며 해양에서는 적조류가 주로 우점을 한다. 녹조류는 Chlorophyll로 대체 분석을 진행하고, 남조류는 Phycocyanin, 적조류는 Phycoerythrin으로 대체분석을 하고있다. 본 연구는 하천에서 성장하는 남조류를 분석하기 위해, LISST-HAB Sensor를 통해 Phycocyanin을 측정하고 조류검경을 통한 남조류 세포수와 비교분석을 진행 하였다.

Nam *et al.* (2021)의 연구에서 제시한 방법을 통해 2L 용량 비커에 절연테이프를 이용해 벽반사를 제거하였으며, 바닥 반사제거를 위해 비커의 아래에 특수 화학 처리된 반사천을 두었다(Fig. 3). 반동채수기를 통해 얻은 현장시료를 비커에 옮겨 담은 후, LISST-HAB Sensor로 데이터를 측정하였다. 측정한 데이터의 보정을 위해 Sensor manual에 제시된 보정식에 필요한 증류수, 로다민(200, 400 ppb) 용액을 준비하고 시료와 같이 측정하여 데이터를 정규화 시켰다(Turner Designs, 2020). 측정된 시료는 용기에 다시 옮겨 담고 실험실에서 조류검경을 실시하였다.

2.4 초분광영상 측정 방법

초분광영상 측정은 조류 검경 및 형광센서의 데이터와 비교를 위해 동일한 시료를 사용하여 분광데이터를 수집하였다. 방사보정을 위해 반사천을 두고 시료를 담은 비커를 반사천에 올려두고 초분광영상을 수집하였다. 사용된 초분광센

서는 Corning사의 micro HSI SHARK 모델이며 측정범위는 4 nm 간격으로 400~1,000 nm 측정이 가능하다. 이 센서는 Line Scanning 방식으로 면단위로 측정을 하기 때문에 90°로 유지하기 위해 Gimbal을 이용하여 흔들림을 보정하고 수직으로 촬영을 진행하였다(Fig. 4).

2.5 초분광영상 분석 방법

취득한 원본 초분광영상에 방사보정을 진행하였다. 방사보정을 위해 특수 제작된 6, 12, 48, 64% 반사율을 가지는 반사천을 이용하여 방사보정을 진행하였다. 방사보정에 사용된 식은 아래와 같다(Eq. (1)).

$$\lambda_R = \lambda_{Gain} \times \lambda_{DN} + \lambda_{Offset} \tag{1}$$

여기서, λ_R 은 λ_{DN} 에 대한 반사율(%), λ_{DN} 은 파장, λ_{Gain} 은 λ_{DN} 을 반사율로 보정하기 위한 기울기, λ_{Offset} 절편값이다. Gwon *et al.* (2020)에서 제시한 방법을 통해 보정이 완료된 초분광영상에 ROI (Region of interest) 가로(10 pixel) × 세로(10 pixel) 크기로 1개의 시료당 총 100개 pixel 분광정보를 추출하여 평균화 시켰다. 평균화 된 조류 스펙트럼에 파장별 반사도 값을 최대한 유지하고 국지적 경향을 반영하여 전체적인 추세를 도출하는 Super Smoother 기법을 적용 하고, 조류 분광 스펙트럼 비교를 위해 조류 분광 스펙트럼의 강도를 일치시키기 위해 Vector Normalize로 정규화시켰다(Fig. 5).

정규화된 전체 파장에 대한 조류 분광 스펙트럼을 You *et al.* (2020)에서 제시한 최적밴드탐색기법(Optimal Band Ratio Analysis, OBRA)를 적용하여 전체 파장에 대한 두 개의 파장을 선택하여 밴드비와 Phycocyanin, 남조류세포수 실측값 간



Fig. 4. HSI sensor measurement

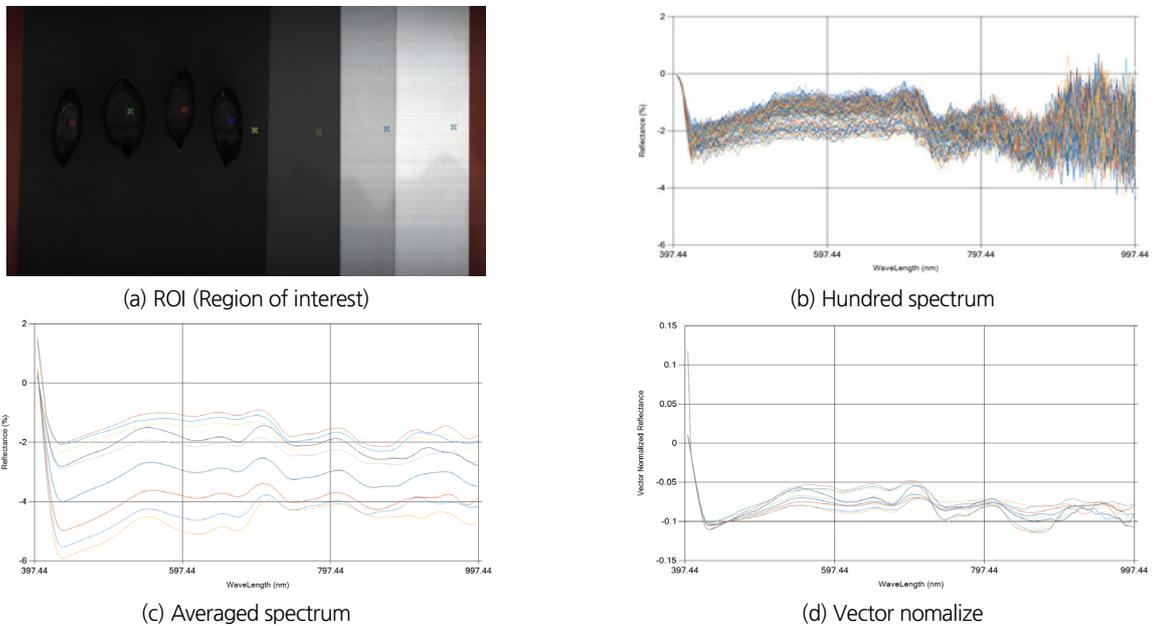


Fig. 5. HSI method of analysis

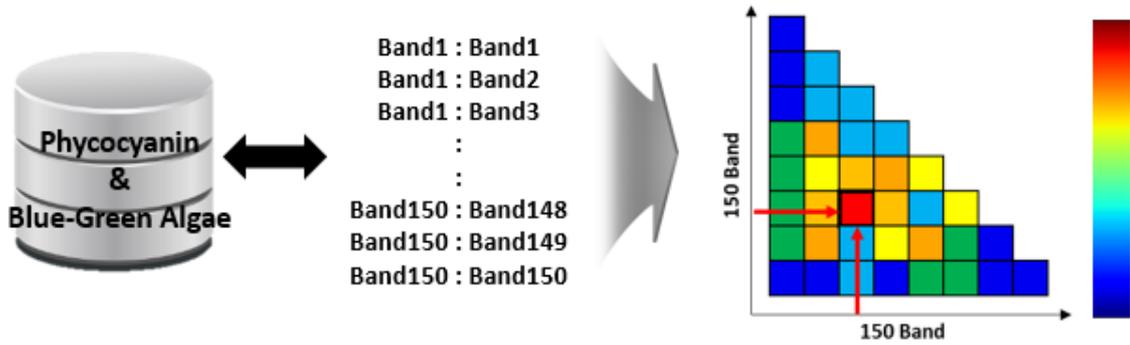


Fig. 6. Optimal band ratio analysis method

의 회귀분석을 실시하여 오차와 상관계수를 산정하고 최대 상관계수를 나타낸 두개의 파장을 선택하였다(Fig. 6).

3. 실험 결과

3.1 Phycocyanin-남조류세포수 결과

현미경을 통해 검경한 조류세포수와 LISST-HAB 센서를 이용한 Phycocyanin 결과값을 Table 2에 나타내었다. 조류세포수의 경우 약 50,000 cells/ml ~ 285,000 cells/ml 까지 나왔으며 이는, 국내 조류경보제 발령기준으로 경계에 해당하는 수준이었다.

본 연구의 목적인 초분광데이터를 통한 남조류세포수 추정식을 개발하기 위해 Phycocyanin 농도를 남조류세포수로 산정하기 위해 선형회귀분석을 진행하여 회귀식과 결정계수를 나타냈다. 이때 결정계수는 0.94로 매우 높은 것으로 나타났다(Fig. 7).

3.2 Optimal band ratio analysis (OBRA) 결과

조류검경과 LISST-HAB 측정에 사용된 동일시료의 데이터값을 실측값으로 하여 초분광센서로 촬영된 초분광데이터를 이용하여 OBRA 분석을 통해 최대 상관계수를 나타낸 두 파장을 선택하였다. 선택된 두 개의 파장에 해당하는 광량을 서로 나눈 밴드비(Eq. (2))를 활용하여 Phycocyanin 농도 산정 회귀식을 산정했다. 그리고 Phycocyanin과 남조류세포수의 상관관계를 분석하여 회귀식을 산정했다.

$$\lambda = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (2)$$

Phycocyanin을 실측값으로 하여 분석시 405, 850 nm 두 파장에서 상관성이 0.978로 매우 높은 결과값을 나타내었다

Table 2. Measurement result of picocyanin and Blue-green algae cell count

Date	Measuring point	Phycocyanin (ppb)	Blue-Green Algae (cells/ml)	Note
2022.07.06	Right bank	131.734	86,580	guard
	middle bank	102.742	76,407	
	Left bank	135.220	86,680	
2022.07.07	Right bank	76.359	65,047	
	middle bank	77.852	56,067	
	Left bank	78.412	57,433	
2022.07.12	Right bank	180.997	103,467	
	middle bank	197.802	100,867	
	Left bank	212.400	108,850	
2022.07.13	Right bank	306.705	186,200	
	middle bank	455.665	206,393	
	Left bank	243.374	176,140	
2022.07.28	Right bank	129.490	84,133	
	middle bank	109.692	79,967	
	Left bank	109.553	77,475	
2022.08.08	Right bank	127.419	66,217	
	middle bank	85.659	62,900	
	Left bank	71.135	86,153	
2022.08.09	Right bank	307.050	196,033	
	middle bank	242.573	144,087	
	Left bank	328.027	179,492	
2022.08.10	Right bank	353.806	178,833	
	middle bank	661.577	285,533	
	Left bank	445.335	224,487	
2022.08.12	Right bank	68.625	50,650	
	middle bank	159.005	91,853	
	Left bank	113.445	77,417	
2022.08.15	Right bank	99.680	77,578	
	middle bank	97.344	75,556	
	Left bank	92.393	72,893	

(Fig. 8). 남조류세포수를 실측값으로 분석시 609, 814 nm 두 파장에서 상관성이 0.987로 Phycocyanin보다 더 높은 결과 값을 나타냈다(Fig. 9).

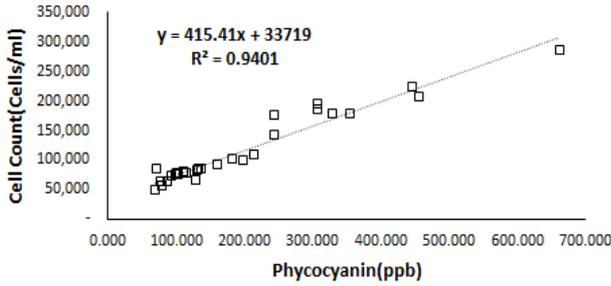


Fig. 7. Blue-green algae interberntion graph

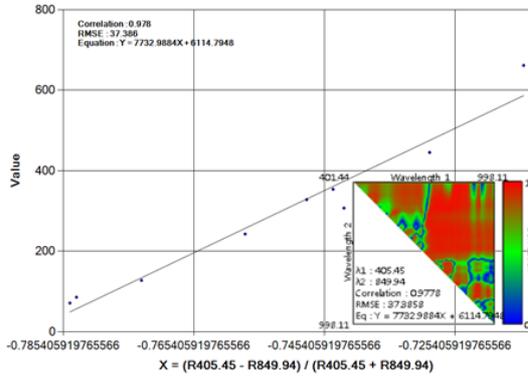


Fig. 8. Phycocyanin OBRA result

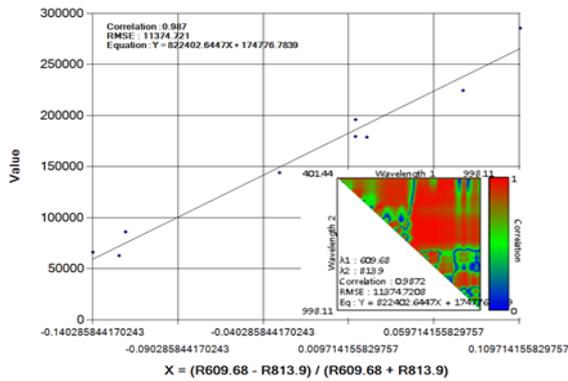


Fig. 9. Blue-green algae OBRA result

Table 3. Phycocyanin OBRA result

$\lambda_{1(PC)}$	405.45 nm
$\lambda_{2(PC)}$	849.94 nm
Gain	7,732.99 ppb
Offset	6,114.79 ppb

3.3 Estimating equation 결과

첫 번째로 Phycocyanin 농도를 이용한 남조류세포수 추정 식 개발을 위해 Phycocyanin 농도값을 실측값으로 OBRA 분석을 통해 얻은 회귀식(Eq. (3a))과 회귀식에 들어가는 인자는 Table 3에 값을 나타내었다.

$$\lambda_{(PC)} = (\lambda_{1(PC)} - \lambda_{2(PC)}) / (\lambda_{1(PC)} + \lambda_{2(PC)}) \quad (3a)$$

여기서, $\lambda_{(PC)}$ 는 Phycocyanin 반사율, $\lambda_{1(PC)}$ 은 400~1000 nm에서 선택된 첫번째 파장, $\lambda_{2(PC)}$ OBRA를 통해 얻은 400~1000 nm에서 선택된 2번째 파장이다. Eq. (2a)을 통해 얻은 $\lambda_{(PC)}$ 를 아래식에 대입하여 Phycocyanin 농도를 산정하였다(Eq. (3b)).

$$Phycocyanin^* = Grain \times \lambda_{(PC)} + Offset \quad (3b)$$

여기서, $Phycocyanin^*$ 은 Phycocyanin 농도, $Grain$ 은 $\lambda_{(PC)}$ 를 반사율로 보정하기 위한 기울기 계수, $Offset$ 은 절편값이다. Eq. (2b)를 통해 얻은 $Phycocyanin^*$ 값을 남조류세포수-Phycocyanin 선형회귀식에 대입하여 남조류세포수를 추정하였다. 식은 다음과 같다(Eq. (3c)).

$$Algae_{(PC)} = 415.41 \times Phycocyanin^* + 33719 \quad (3c)$$

두 번째로 남조류세포수를 실측값으로 OBRA 분석을 통해 얻은 회귀식(Eq. (4a))과 회귀식에 들어가는 인자는 Table 4에 나타내었으며 식은 아래와 같다.

$$\lambda_{(Cell)} = (\lambda_{1(Cell)} - \lambda_{2(Cell)}) / (\lambda_{1(Cell)} + \lambda_{2(Cell)}) \quad (4a)$$

여기서, $\lambda_{(Cell)}$ 는 남조류세포수 반사율, $\lambda_{1(Cell)}$ OBRA를 통해 얻은 1번 파장, $\lambda_{2(Cell)}$ OBRA를 통해 얻은 2번 파장이다. 1번 식을 통해 얻은 $\lambda_{(Cell)}$ 를 아래식에 대입하여 남조류세포수를 산정하였다(Eq. (4b)).

Table 4. Blue-green algae OBRA result

$\lambda_{1(Cell)}$	609.68 nm
$\lambda_{2(Cell)}$	813.90 nm
Gain	822,402.64 cells/ml
Offset	174,776.78 cells/ml

Table 5. Blue-green algae cell count result

Date	Site	Blue Green Algae (cells/ml)	Phycocyanin Estimating equation		Blue-Green Algae Estimating equation	
			Cell count (Cells/ml)	Error factor (%)	Cell count (Cells/ml)	Error factor (%)
20220808	Right bank	66,217	54,103	22.4	59,823	10.7
	middle bank	62,900	57,348	9.7	78,216	19.6
	Left bank	86,153	89,323	3.5	77,920	10.6
20220809	Right bank	196,033	188,993	3.7	187,472	4.6
	middle bank	144,087	140,355	2.7	153,295	6.0
	Left bank	179,492	170,645	5.2	187,480	4.3
20220810	Right bank	178,833	183,622	2.6	193,704	7.7
	middle bank	285,533	277,393	2.9	264,742	7.9
	Left bank	224,487	231,135	2.9	237,063	5.3

$$\text{Blue - Green Algae}^* = \text{Grain} \times \lambda_{(\text{Cell})} + \text{Offset} \quad (4b)$$

위의 추정식을 통해 산정된 남조류세포수의 결과값은 다음과 같다(Table 5). Phycocyanin 추정식을 활용하였을 때 평균 오차율 6.2%로 나타났으며, 남조류세포수 추정식을 활용하였을 때 평균 오차율 8.5%로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 유해남조류 발생시 현장조사 한계점을 극복하기 위해 진행하였다. 실제 하천에 발생한 조류를 채취하여 현미경으로 조류검경 및 광학센서, 초분광센서를 활용하여 남조류세포수와 Phycocyanin 농도를 측정하여 초분광데이터 분석을 통해 남조류세포수 추정 연구를 진행하였다. 조류검경을 통해 산정된 남조류세포수와 Phycocyanin 농도를 회귀 분석하여 회귀식을 얻었으며, 결정계수가 0.94로 매우 높은 결과값을 나타내었다. 초분광데이터는 OBRA 분석을 통해 Phycocyanin, 남조류세포수 실측값에 대한 회귀식을 이용하여 남조류세포수 추정값과 조류검경을 통한 실측 남조류세포수 값과 비교분석을 진행하였다. Phycocyanin OBRA 추정식을 통해 초분광데이터로 Phycocyanin 농도를 산정하였고, 남조류세포수-Phycocyanin 추정식에 대입하여 남조류세포수 추정시 평균 오차율 6.2%로 나타났으며, 남조류세포수 OBRA 추정식을 통해 초분광데이터로 남조류세포수 추정시 평균 오차율 8.5%로 나타났다. 초분광데이터 분석시 Phycocyanin 농도를 산정하고 남조류세포수-Phycocyanin 추정식에 대입하여 분석하는 것이 더 높은 정확도의 결과를 얻을 수 있었다. Back *et al.* (2016)에서 남조류 생체량 추정 회귀모형은 오차율이

7.75%의 결과값을 나타냈고 본 연구에서 남조류세포수-Phycocyanin 추정식을 활용하여 남조류세포수를 추정하였을 때 평균오차율 6.2%로 개선이 된 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 얻은 남조류세포수 추정식을 원격탐사 연구에 활용하여 면단위의 공간적 데이터에 적용시 넓은 범위의 남조류 측정연구에 도움이 될 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호22DPIW-C153746-04). 이에 감사드립니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Reference

- Back, S.C., Park, J.K., and Park, J.H. (2016). "Spatial distribution mapping of cyanobacteria in Daecheong reservoir using the satellite imager." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 58, No. 2, pp. 53-63.
- Choe, E.Y., Jung, K.M., Yoon, J.S., Janh, 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*, Vol. 37, No. 3, pp. 419-430.

- Gwon, Y., Kim, D., and You, H. (2020). "A standardized procedure on building spectral library for identifying hazardous chemicals mixed in rivers using UAV-based hyperspectral technique." *In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 161-161.
- Hillebrand, H., Dürselen, C.D., Kirschtel, D., Pollinger, U., and Zohary, T. (1999). "Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae." *Journal of Phycology*, Vol. 35, No. 2, pp. 403-424.
- Jung, W.S., and Kim, Y.D. (2019). "Effect of abrupt topographical characteristic change on water quality in a river." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, pp. 3250-3263.
- Jung, W.S., Kim, S.E., and Kim, Y.D. (2021). "Analysis of influential factors of cyanobacteria in the mainstream of Nakdong River using random forest." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 27-34.
- Kim, B.C. (2017a). "Causes and countermeasures for algal bloom." *Water for Future*, Vol. 50, No. 6, pp. 8-14.
- Kim, G.J., Lee, S.H., and Lee, H.H. (2003). "Chlorophyll-a analysis by optical sensor." *Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 5, pp. 734-737.
- 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." *Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, Vol. 12, pp. 457-463.
- Kim, S.G. (2017b). "Algae bloom and Algae warning system." *Water for Future*, Vol. 50, No. 7, pp. 22-26.
- Ministry of Environment (ME). (2020). *2020 Algae (Green Algae) occurrence and response annual report*. pp. 3-7.
- Montagnes, D.J., Berges, J.A., Harrison, P.J., and Taylor, F.J.R.L. (1994). "Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll a from volume in marine phytoplankton." *Limnology and Oceanography*, Vol. 39, No. 5, pp. 1044-1060.
- Nam, G.B., Shin, H.J., Ha, R., Song, H.O., Yoo, J.H., Lee, H., Park, S.H., Kang, T.G., and Kim, K.H. (2021). "Quantification of phycocyanin in inland waters through remote measurement of ratios and shifts in reflection spectral peaks." *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 16, 3335.
- Seo, D.M., Oh, S.W., Dong, D.D., Lee, J.W., and Sed. S.K. (2016). "Real-time micro-algae flocculation analysis method based on Lens-free Shadow Imaging Technique (LSIT)." *The Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 19, No. 4, pp. 341-348.
- Shin, Y.H., Barnett, J.Z., Song, E., Gutierrez-Wing, M.T., Rusch, K.A., and Choi, J.W. (2015). "A portable fluorescent sensor for on-site detection of microalgae." *Microelectronic Engineering*, Vol. 144, pp. 6-11.
- Turner Designs (2020). *CYCLOPS Submersible sensors user's manual*. pp. 9-15.
- You, H.J., Kim, D.S., and Shin, H.S. (2020). "Evaluation of depth measurement method based on spectral characteristics using hyperspectrometer." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 2-1, pp. 103-119.