

## 충주댐(청풍호) 수상태양광 시설이 호수 수질에 미치는 영향

김학준 · 곽석남<sup>1</sup> · 윤 민<sup>2</sup> · 김일규<sup>3</sup> · 김영성<sup>4</sup> · 김동섭<sup>4,\*</sup>

부경대학교 화학과, <sup>1</sup>㈜ 환경생태공학연구원, <sup>2</sup>부경대학교 응용수학과, <sup>3</sup>부경대학교 환경공학과,  
<sup>4</sup>한국수자원공사 수자원연구원

### Effect of a Floating Photovoltaic System (FPV) at Chungju Dam (Cheongpung Lake) on Water Quality.

Hak Jun Kim (0000-0001-8257-809X), Suhknam Kwak<sup>1</sup> (0000-0003-0785-9443), Min Yoon<sup>2</sup> (0000-0002-6124-9163), Il-Kyu Kim<sup>3</sup> (000-0002-9859-2475), Young-Sung Kim<sup>4</sup> (0000-0001-5422-1915) and Dong-sub Kim<sup>4,\*</sup> (0000-0003-1936-7737) (Department of Chemistry, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; <sup>1</sup>Environ-Ecological Engineering Institute Co, Ltd. Busan 48058, Republic of Korea; <sup>2</sup>Department of Applied Mathematics, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; <sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; <sup>4</sup>K-water institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 34350, Republic of Korea)

**Abstract** In this study we investigated the effect of a floating photovoltaic (FPV) system in Cheongpung Lake on water quality. The FPV with a tilt angle of 33° covered ca. 0.04% of surface area (97 km<sup>2</sup>) of Chungju Lake. The water qualities of the whole lake before and after installation of FPV were first compared. DO, BOD, TOC, and Chl-*a* of the whole lake were increased, while conductivity decreased after installation period at the significance level of 0.05. This change was probably due to the increased influx of nutrients by 40% resulting from increased precipitation during the same period. We also measured water quality parameters on May and Nov. 2017 at the FPV center (FPVC) and nearby control sites, and compared water quality. The result showed that the FPVC and nearby sites were not significantly different ( $p > 0.05$ ), demonstrating that the FPV does not cause a decline of water quality. The water temperature, light intensity, and phytoplankton community were also measured. The water temperature was not different between the sites, while the light intensity decreased to 27~50%. Despite reduced light intensity at FPVC, the phytoplankton standing crops and the number of species were not significantly different ( $p > 0.05$ ). However, in the early November samples, standing crops was significantly higher in FPVC than control with periphytic diatoms belonging to *Aulacoseira* genus being dominant. This may be due to the temporal water body behavior or local retention of current by FPV system. This study may provide a measure of future installation of a FPV system.

**Key words:** floating photovoltaic, water quality changes, light intensity, phytoplankton, periphyton

## 서 론

국제에너지기구(International Energy Agency)의 보고에 의하면 2016년 세계 1차에너지 공급량 중 화석연료가 87%, 재생에너지가 13.7%를 차지하고 있다. (IEA, 2018; REN21, 2018; Lee and Cho, 2018). 전세계적으로 재생에너

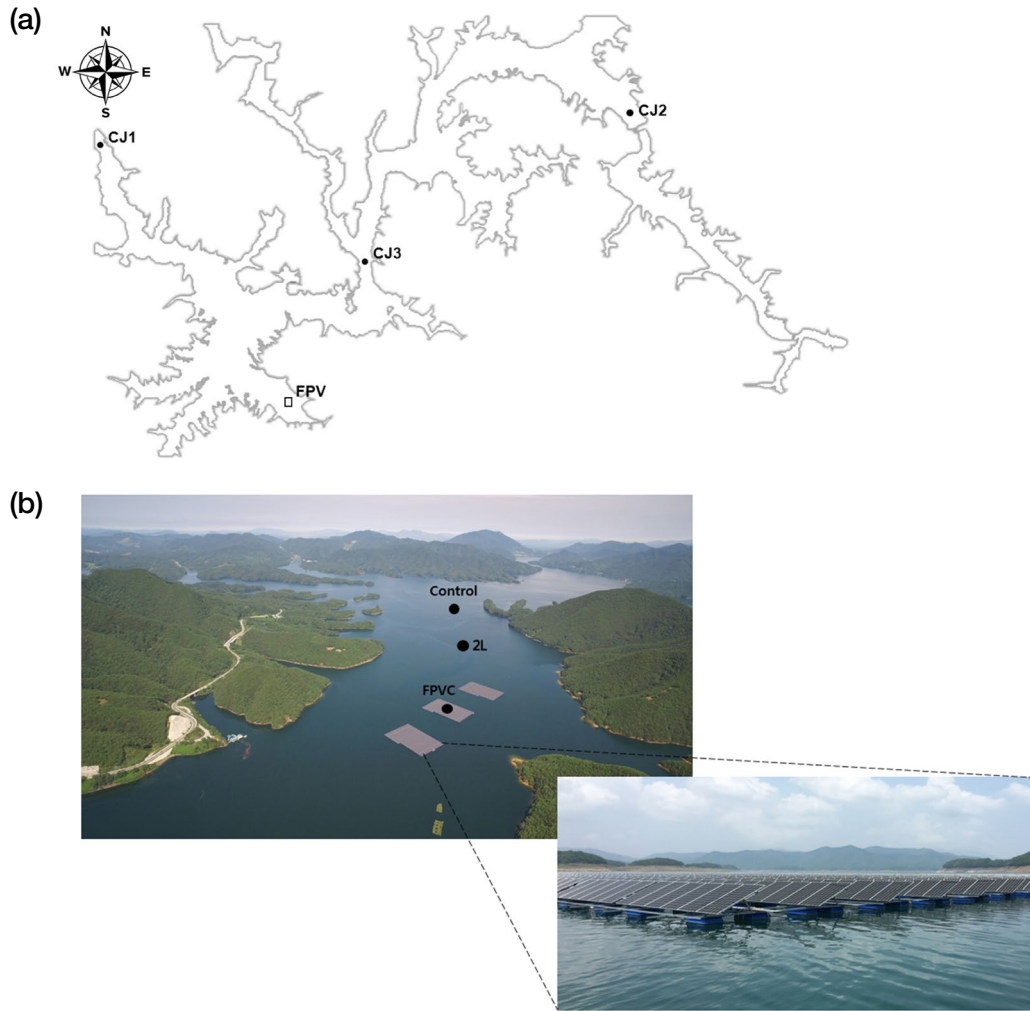
Manuscript received 7 August 2019, revised 6 September 2019, revision accepted 6 September 2019  
\* Corresponding author: Tel: +82-42-870-7451, Fax: +82-42-870-7499, E-mail: kimds@kwater.or.kr

지 공급량은 1990년 이래 연평균 2%씩 성장 중인데 이 중 태양광과 풍력이 각각 연평균 37.3%와 23.6%의 성장세로 가장 큰 비중을 차지하고 있다(Lee and Cho, 2018). 국내의 신재생에너지 보급 현황도 세계적 경향과 매우 유사하다. 2017년 국내 신재생에너지 비중은 전년대비 0.84% 포인트 증가하여 전체 에너지 공급량의 8.08%를 차지하고 있다(Lee and Cho, 2018). 특히, 2017년 누적 설치 용량이 약 5.6 GW인 태양광의 생산량과 발전량이 각각 1,516,349 toe와 2,169,014 MWh로 28.8%와 37.8%의 증가세를 보였다(KEA, 2019). 2017년 ‘재생에너지 3020 이행계획’ 발표와 재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standard) 도입 등으로 태양광이 재생에너지 보급에 차지할 비중이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다(Lee and Cho, 2018). 태양광발전은 설치 위치에 따라 육상태양광(Overland photovoltaic)과 수상태양광(Floating photovoltaic)으로 나눌 수 있다(Sahu *et al.*, 2016). 육상태양광 발전시설 건설에 따른 환경적, 사회적 갈등이 증가하고 있고, 부정적 영향이 대두됨에 따라 그 대안으로 댐 및 저수지의 정수역을 활용한 수상태양광 발전이 주목받고 있다. 수상태양광은 호수, 댐, 저수지 등 수상에 설치하여 운영하는 태양광 발전시설로 육상에 구조물을 설치하여 지지하는 방식이 아닌, 물의 부력을 이용하여 수면에 설치하는 방식이다. 2007년 미국에서 최초로 설치·운영된 이후, 수상태양광 발전에 대한 관심과 설치가 이탈리아, 프랑스, 스페인, 중국, 영국 등 전 세계적으로 급증하고 있다(Liu *et al.*, 2018).

수상태양광은 육상태양광에 비해 다수의 이점이 있는데, 이를테면 유휴 수면 활용을 통한 자연 및 생태계 훼손 감소와 토지의 효율적 이용, 대규모 부지 확보 용이, 먼지 등에 의한 표면 오염 저감, 수면의 냉각 효과로 발전 효율 약 10% 증가, 일사량 차단으로 인한 녹조 완화 효과, 물 증발 감소로 수자원 보호 효과, 어류 서식에 유리한 환경 조성 등을 들 수 있다. 이런 이점 때문에 최근 수상태양광의 설치가 전 세계적으로 증가 추세에 있으며(Sahu *et al.*, 2016; Choi, 2014), 국내 수상태양광도 2018년 하반기 기준, 다목적 댐에 총 3개소(5,600 kW), 농업용 저수지에 총 21개소(19,750 kW), 발전소 및 취수로에 2개소(1,500 kW)가 설치·운영되는 등 설치가 증가하고 있다(KRCC, 2017; KRCC 2018). 최근 국내 조사 결과에 의하면 수상태양광 시설이 수질 및 수생태계에 미치는 영향에 미미한 것으로 보고되고 있다(K-Water, 2012; Rho, 2014; Lee *et al.*, 2017; KRCC, 2017, 2018). Rho (2014)가 2011년~2012년과 2013년~2014년에 걸쳐 합천호내 100 kW와 500 kW의 수상태양광(수상고정식, 경사각 33°) 시범사업 시설에 대해 수행한 환경모니터링 결과 주요 기자재인 전선관, 부

력제, 수증케이블 등 구조물에 대한 카드뮴, 수은, 셀레늄, 납 등을 포함한 43개 항목을 위생 안전기준에 준하여 분석한 결과 환경기준치를 벗어나지 않아 적합 판정을 받았으며, 평균 DO와 COD도 각각 4.96~12.61 mg L<sup>-1</sup>와 1.8~3.8 mg L<sup>-1</sup>로 하천 및 호소 수질환경기준의 좋음 이상의 결과를 보였다. 식물 플랑크톤의 조성도 수상태양광에 크게 영향을 받지 않았는데 조사지점과 대조지점 간의 우점종은 각 시기마다 같은 것으로 나타났다(Rho, 2014). 또한 Lee *et al.* (2017)은 금광저수지에 설치된 수상 회전식 태양광 발전시설에서 수행한 시간 및 수심별 수온, pH, DO, Chl-*a*, blue-green algae (BGA) 변화 분석 결과, 수질 항목들은 시설의 차광에 의해 통계적으로 유의한 차이를(p≥0.05) 보이지 않았다고 보고하였다. 예외적으로 7월 비차광구역보다 차광구역에서 Chl-*a*와 BGA가 다소 높게 관측되었다. 2017년~2018년 수상태양광이 설치된 오테 및 지평저수지를 대상으로 실시한 환경모니터링 결과에서도 앞선 연구와 유사하게 수상태양광 시설에 의한 유의미한 수질 차이는 나타나지 않은 것으로 분석되었다(KRCC, 2017, 2018). 그 밖의 물리적 환경인 수온은 수상태양광 시설에 의해 약 0.1~0.2°C 정도의 유의미한 차이를 보였으나 수심 3 m 하층부터 평균 수온이 같아지는 것으로 관측되었다. 하지만 조도는 수상태양광에 의한 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 수생생물인 식물 플랑크톤, 동물 플랑크톤, 어류 및 저서동물의 종풍부도와 종다양성은 수상태양광 패널로부터 이격거리가 증가함에 따라 낮아지다가 수변부에 가까워지면 다시 높아지는 경향을 띠는 것으로 분석되었다. 특히 어류는 저수지의 지형 및 수초 등의 영향을 받지만 수상태양광 영향권 내의 경우 비영향권과 비슷하거나 다소 많은 것으로 관찰되는데 이는 수상태양광의 이점을 지지하는 결과로 보인다. 한편, 최근 Yamamichi *et al.* (2018)은 최대 수심 2m의 얕은 인공 연못에서 실시한 차광 실험에서 차광 시설이 오히려 유해남조류의 증식을 더 촉진할 수 있다는 상반된 연구 결과를 보고하였을 뿐 아니라 수상태양광이 설치된 일본의 일부 저수지에서 녹조 발생이 더 심해졌다는 언론 보도가 있었다. 이와 같이 수상태양광이 저수지와 호수의 수질 및 수생태계에 미치는 영향에 상반된 결과는 설치된 저수지 및 호소의 물리적 환경과 수상태양광의 종류 및 시설의 크기에 따라 다양할 수 있으며 이에 대한 연구 또한 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 충주댐(청풍호) 수상태양광 설치 전·후의 호소의 이화학적 수질 변화를 분석하고 수상태양광 패널이 수체에 미치는 물리적 변화와 조류의 상관관계를 연구하였다. 조사지점은 태양광 패널 중앙 직하부와 부유체에서 2배 또는 4배 이격된 지점을 대조구로 하였다.



**Fig. 1.** Sampling and floating photovoltaic system (FPV)-installed sites in the Chungju Lake. (a) sampling sites, CJ1, 2, 3, and FPV installed site and (b) picture of FPV and sampling sites: FPVC, FPV center; 2L, sampling site double (2X) as far away as the length of longer side of the rectangular floating photovoltaic; and control, sampling site quadruple (4X) as far away as the length of longer side of the rectangular floating photovoltaic.

본 연구는 향후 수상태양광 설치에 관한 정책수립에 필요한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 재료 및 방법

### 1. 수상태양광 발전시설 및 조사지 개황

본 연구의 조사지는 한국수자원공사가 제천시 한수면 북노리 일원 충주댐(청풍호) 저수면에 설치한 수상고정식 수상태양광 발전시설로 설치면적은 39,600 m<sup>2</sup>, 개발용량은 3.0 MW (300 Wp/모듈)이며, 수상태양광시설을 운영하기 위한 변전소 부지면적은 1,100 m<sup>2</sup>이다(Fig. 1). 충주댐(청풍호) 수상태양광시설은 2012년 합천댐, 2015년 보령댐에

설치된 SOLATUS 모델로 저수면적(97 km<sup>2</sup>)의 0.04%를 차지하며 연간 1,120가구 사용량에 해당하는 4,031 MWh를 생산할 수 있다. 최대 발전효율과 발전량을 고려하여 방위각과 경사각은 각각 정남향(0°)과 33°로 하였다. 수상태양광 발전시설의 구조체는 안전성이 확보된 알루미늄 구조체를, 부유체는 Fiber reinforced plastics (FRP)를 사용하였다. 계류시스템 방식은 다중침자 현수선방식으로 보조무게추를 다중으로 설치하고 교각의 구조물 안정성을 위해 사용하는 현수선방식을 접목한 계류방식이다. 이 방식은 비교적 댐 수위가 높은 곳에 효과적으로 적용이 가능하고 풍속에 의해 구조물이 움직임이나 쓸림 현상이 발생할 경우 원래 위치로 복귀가 가능한 장점을 가지고 있다. 본 연구대상 수상태양광이 설치된 청풍호는 1985년 12월 준공된

충주 다목적댐에 의해 형성된 인공호로 충주, 제천, 단양에 걸쳐 있으며 유역면적 6,648 km<sup>2</sup>, 저수면적 97 km<sup>2</sup>, 총저수량 27.5억 m<sup>3</sup>에 달한다.

## 2. 자료 수집 및 현장 조사

충주댐(청풍호) 수상태양광 설치 전·후의 이화학적 수질 분석은 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr>)의 수질측정망에서 제공되는 3 지점(지점명 충주댐 1, 2, 3)의 수질자료를 이용하였다(Fig. 1). 대상 3지점은 충주댐1(충청북도 충주시 종민동(댐앞), CJ1), 충주댐2(충청북도 제천시 청풍면 양평리, CJ2), 충주댐3(충청북도 제천시 한수면 황강리, CJ3)로 하였고 수질자료는 2015년 2월부터 2019년 4월까지의 각 지점별 월평균 자료를 48개를 이용하였다. 분석에 이용한 항목은 pH, 수온, DO (dissolved oxygen), BOD, COD, TOC, SS, 총질소(TN), 용존총질소(DTN), 암모니아성질소(NH<sub>3</sub>-N), 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N), 총인(TP), 용존총인(DTP), 인산염인(PO<sub>4</sub>-P), 전기 전도도(E·C), Chl-*a*로 하였다. 유해 남조류 자료는 물환경정보시스템에서 제공하는 CJ1과 2의 자료를 활용하였다.

수상태양광 시설에 의해 수질 영향 분석은 실험구와 대조구에서 2017년 5월과 11월에 두 차례 측정된 자료를 이용하였다. 실험구(FPV center, FPVC)는 각 세계의 1 MW 발전시설 중 가운데 발전시설의 중앙 직하부로, 대조구는 부유체 2배(0.5 km, 2L)와 4배(약 1 km, control) 이격지점으로 하였다(Fig.1). 조사 항목은 pH, COD, TOC, SS, DO, T-P, T-N, Chl-*a*, BOD, 수온, 전기전도도, 탁도로 하였다.

수상태양광 시설이 수체의 물리환경과 조류 군집에 미치는 영향은 총 5차례의 현장조사를 실시하여 분석하였다. 현장 조사 시기는 2018년 9월과 10월 각 1회, 11월 초, 중, 하순 각 1차례씩 총 3회로 하였다. 조사 지점은 FPVC와 대조구인 control로 하였다. 수상태양광 발전시설물이 수체의 물리환경에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구의 물리환경 조사는 수심별 수온과 광도와 증발산량으로 하였다. 수온과 광도(일사량) 등은 조류 성장에 매우 중요한 인자이므로 향후 수상태양광 발전시설이 수생태계에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 필수 조사항목이라 할 수 있다. 물리환경은 수온과 수중 광도를 측정하였다. 수심별 수온 조사는 연속 조사를 수행할 수 있는 수온로거(water temperature logger, HOBO® Water Temp Pro v2)를 이용하여 회차별 24시간 연속 조사로 진행하였다. 조사 수심은 표층, 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 3 m, 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 9 m, 10 m로 하였다. 수온로거를 FPVC에 수심별로 설치하여 실측하였으며, 대조구인 control에서는

부이장치를 이용하여 수심별로 설치하여 실측하였다. 발전시설이 수중 광도에 미치는 영향을 조사하기 위해 수중퀀텀센서(underwater quantum sensor)가 탑재된 데이터로거(LI-COR® Light Sensor Logger)를 이용하여 표층, 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 5 m, 10 m의 수심별로 실측하였다. 수중광 광도조사는 정오를 기준으로 ±1시간 범위 내에 실시하였다. 2차 조사부터 FPVC와 대조구 외에 태양광 패널의 그늘진 곳(FPVS: FPV shaded)을 추가하여 실시하였다. 일사량은 수중광도계를 이용하여 일출, 정오, 일몰 시간에 수표면 광도를 실측하였다. 증발산량은 수표면 온도, 풍속, 상대습도 등의 현장 조사 자료를 아래 Dalton의 추정식 산입하여 계산하였다(Dalton, 1802).

$$E = f'(u)(e_s - e_a)$$

이 식에서 E는 수표면 증발량(mm day<sup>-1</sup>),  $f'(u)$ 는 경험식이 적용된 풍속항(wind function),  $e_s$ 와  $e_a$ 는 대기온도에서의 포화증기압과 실제증기압(mmHg)이다.

식물플랑크톤 군집구조 조사는 수심별 조류를 2.2 L Alpha water sampler (WildCo, FL, USA)를 사용하여 채집하여 실시하였다. 조사 수심은 총 6개로 표층, 0.5 m, 1 m, 2 m, 4 m, 6 m이다. 채집한 시료는 잘 혼합한 후 1L를 시료병에 Lugol 용액 2%을 가하여 고정된 후, 알루미늄 박막으로 병을 감싸 빛을 차단하여 실험실로 운반하였다. 채집한 시료는 현미경 관찰을 위해 침전관에서 48시간 이상 침전시킨 다음, 상등액을 제거하여 10 mL로 농축하였다. 식물플랑크톤의 동정 및 계수는 Sedgwick-Rafter Counting Chamber를 이용하여 100~400배율의 광학현미경 하에서 실시하였다. 조사는 회차별 정오를 기준으로 ±2시간 범위 내에 실시하였다. 조류의 군집 구조는 출현 종과 현존량 자료를 이용하여 다양성 지수(Shannon and Wiener, 1949), 균등도 지수(Pielou, 1966), 풍부도 지수(Margalef, 1958), 우점도 지수(McNaughton, 1967)을 계산하였다.

## 3. 통계 분석

충주댐(청풍호)에 설치한 수상태양광 발전시설이 수질에 미치는 영향을 분석하기에 앞서 수상태양광 시설물 설치 전·후 시기의 충주댐 전체의 수질 변화를 통계 분석하였다. 물환경정보망에서 확보한 CJ1, CJ2, CJ3 세 지점(Fig. 1)의 수질 자료를 시설물 설치 전(2015년 5월~2017년 4월)과 후(2017년 5월~2019년 4월)로 구분하고 지점과 호수 전체에 대한 기술통계 분석을 실시하여 Table 1로 정리하였다. 상자그림(boxplot)은 수질 자료의 분포를 요약해서 시각화할 수 있는 유용한 통계 기법으로 상자

Table 1. Descriptive statistics of water quality parameters at the Cheongpung Lake.

Sites	Statistics	pH		DO (mg L <sup>-1</sup> )		BOD (mg L <sup>-1</sup> )		COD (mg L <sup>-1</sup> )		SS (mg L <sup>-1</sup> )		TN (mg L <sup>-1</sup> )		TP (mg L <sup>-1</sup> )		TOC (mg L <sup>-1</sup> )		Temp (°C)		Cond. (µS cm <sup>-1</sup> )		Chl- <i>a</i> (mg m <sup>-3</sup> )	
		BI <sup>a</sup>	AI <sup>b</sup>	BI	AI	BI	AI	BI	AI	BI	AI	BI	AI	BI	AI	BI	AI	BI	AI	BI	AI	BI	AI
CJ1 <sup>c</sup>	Max	8.7	8.6	16.3	12.8	1.4	1.8	3.7	4.3	3.5	2.8	2.93	2.83	0.147	0.03	2.3	2.7	20.8	23	257	274	4	7.2
	Min	7.5	7.7	5.2	6.3	0.5	0.4	2	2.1	0.2	0.4	2.02	2.09	0.006	0.005	0.7	1	4.9	3.7	202	201	0.8	0.8
	Mean	8.03	8.19	9.55	9.79	0.96	0.91	2.8	2.76	1.56	1.62	2.51	2.41	0.02	0.017	1.65	1.97	12.52	13.21	228	232.4	1.72	2.17
	SD	0.31	0.21	3.09	2	0.21	0.3	0.52	0.5	0.69	0.82	0.26	0.24	0.02	0.009	0.44	0.42	5.25	6.29	17.66	18.35	0.98	1.24
CJ2 <sup>d</sup>	Max	8.9	8.7	14.7	20.6	2	2.9	3.4	2.9	5.1	65.2	4.11	3.51	0.029	0.047	1.7	2.8	23.4	23.9	345	279	6.6	9.3
	Min	7.3	7.3	6.4	4.8	0.3	1.2	1.5	2.2	0.4	0.5	1.59	2.13	0.002	0.004	0.8	1.1	3	2.8	212	151	0.6	1.5
	Mean	8.03	8.11	9.95	11.91	1.34	1.94	2.4	2.5	2.2	6.51	2.34	2.69	0.012	0.012	1.2	1.91	14.27	13.95	262.9	238	2.87	3.77
	SD	0.37	0.28	2.05	3.26	0.36	0.46	0.5	0.21	1.18	13.3	0.6	0.36	0.007	0.011	0.22	0.39	6.75	6.93	33.64	25.15	1.6	2
CJ3 <sup>e</sup>	Max	8.7	8.6	13.7	25.2	2	2.9	3.5	2.8	3.9	6.6	4.45	3.34	0.071	0.044	1.6	2.7	21.2	21.7	320	320	4.5	5.7
	Min	7.2	7.2	3.9	5.4	0.2	0.9	1.6	2	0.3	0.4	1.47	2.13	0.001	0.004	0.8	1.2	3.7	3	229	229	0.9	1
	Mean	7.99	7.95	9.2	10.83	1.24	1.8	2.28	2.37	1.17	2.22	2.37	2.61	0.015	0.011	1.19	1.91	13.52	13.2	261.2	261.2	1.92	2.6
	SD	0.377	0.3	2.48	4.34	0.36	0.42	0.42	0.21	0.7	1.72	0.61	0.32	0.015	0.01	0.18	0.36	5.74	6.26	26.84	26.84	0.86	1.2
Total	Max	8.9	8.7	16.3	25.2	2	2.9	3.7	4.3	5.1	65.2	4.45	3.51	0.14	0.04	2.3	2.8	23.4	23.9	345	279	6.6	9.3
	Min	7.2	7.2	3.9	4.8	0.2	0.4	1.5	2	0.2	0.4	1.47	2.09	0.001	0	0.7	1	3	2.8	202	2	0.6	0.8
	Mean	8.02	8.08	9.56	10.84	1.18	1.55	2.49	2.54	1.64	3.45	2.41	2.57	0.01	0.01	1.34	1.93	13.44	13.45	250.7	231	2.17	2.85
	SD	0.35	0.28	2.56	3.41	0.35	0.6	0.52	0.37	0.97	8	0.51	0.33	0.01	0.01	0.37	0.39	5.91	6.42	31.01	35.74	1.28	1.65
	CV	0.04	0.03	0.26	0.31	0.3	0.39	0.21	0.14	0.59	2.31	0.21	0.12	1.12	0.77	0.27	0.2	0.43	0.47	0.12	0.15	0.58	0.58

<sup>a</sup>Before and <sup>b</sup>after installation of the floating photovoltaic; <sup>c</sup>Chungju dam 1; <sup>d</sup>Chungju dam 2; <sup>e</sup>Chungju dam 3

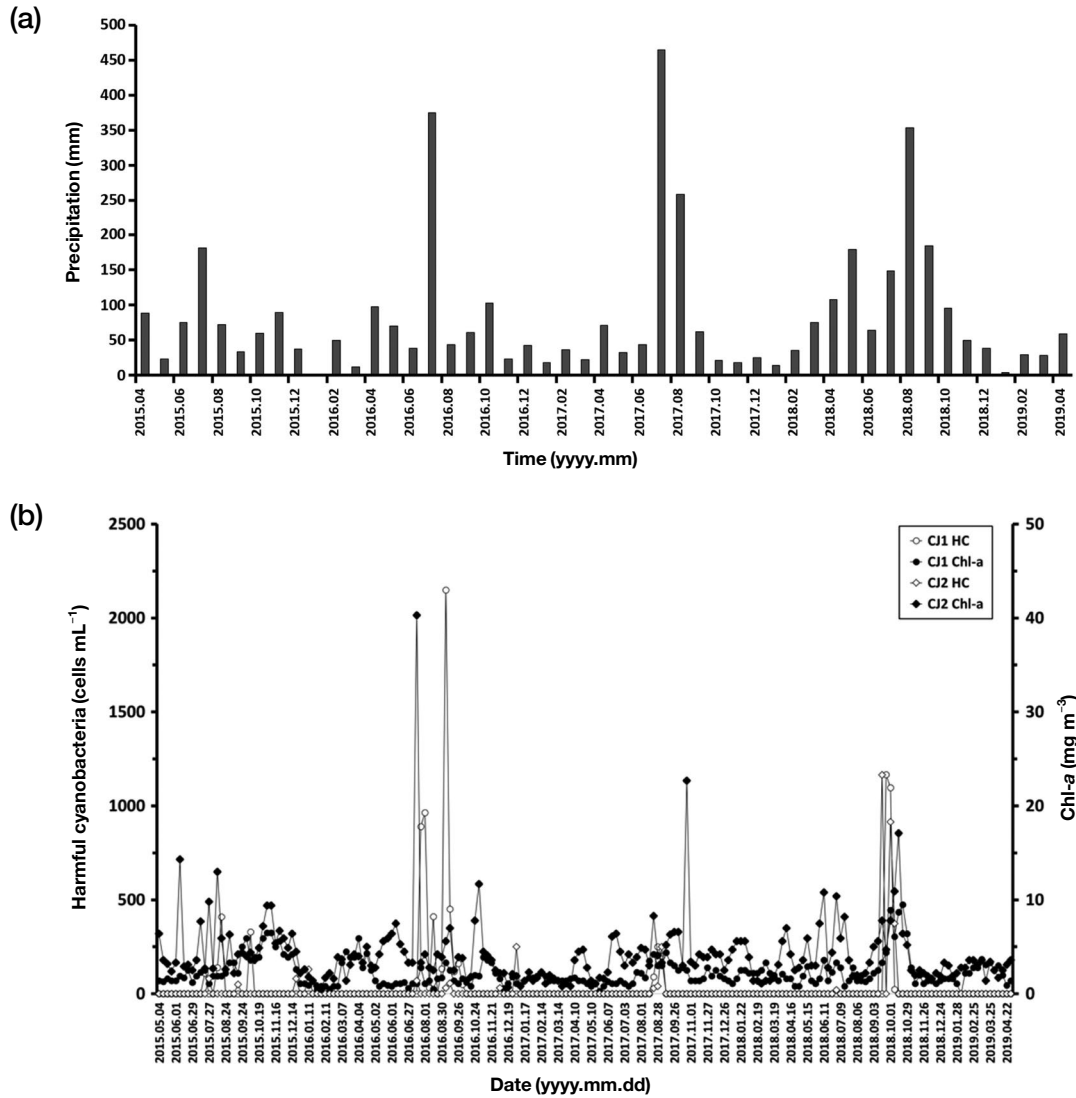


Fig. 2. (a) Precipitation, and (b) concentrations of harmful cyanobacteria and chlorophyll a during the investigation period.

의 범위는 자료의 1사분위수(25%)에서 3사분위수(75%)까지 나타내었고, 중앙값은 흑선으로 표시하였으며, 최소값(1사분위-1.5IQR, interquartile range)과 최대값(3사분위수+1.5IQR)을 나타내었다. 이상치는 점으로 나타내었다. 수질 분석 자료 중 일부를 상자그림으로 Fig. 3에 제시하였다. 수상태양광 발전시설이 청주댐(청풍호)의 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 물환경정보망에서 확보한 3 지점의 데이터를 시설 설치 전과 후로 나누고 기본적인 기술통계 분석을 수행하였으며 상자그림으로 시각화하였다. 태양광 시설 전·후 전체 호수의 수질 변화를 파악하기 위하여 대응표본 t-검정을 실시하였다. 또한 일원분산분석을 통해 세 지점간의 차이가 있는지를 통계적으로 검증하였다. 대조구와 실험구의 수질 측정 자료에 대해서

독립표본 t-검정을 수행하여 수질 변화를 통계적으로 분석하였다. 본 연구의 통계분석은 SPSS<sup>®</sup> software (SPSS ver. 25, IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 사용하여 수행하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 조사지 호수와 수상태양광 시설의 수질 분석

시설 설치 전·후의 청주댐 수질 자료에 대한 대응표본 t-검정결과(Fig. 3), 대부분의 수질 인자는 유의한 수준에서 차이를 보이지 않았지만, DO, BOD, TOC, 전기전도

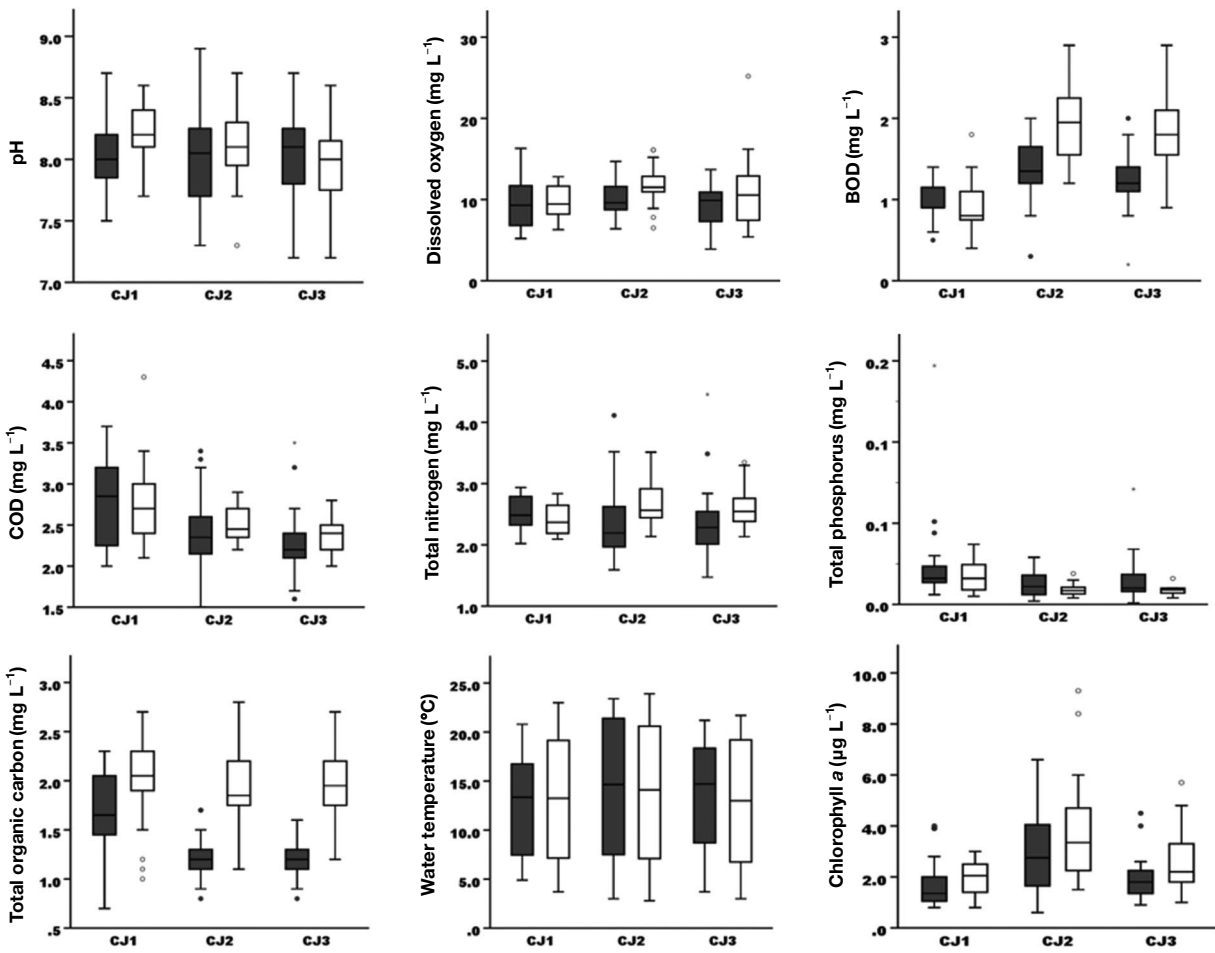


Fig. 3. Box plots of water quality parameters of three sites at Chungju Lake during the investigation period. The box plots corresponding to the period before the installation of floating photovoltaic system were displayed as filled, while those for after the installation of FPV were displayed unfilled.

도, Chl-*a* 항목은 유의한 차이가 나타났다( $p < 0.05$ ). DO, BOD, TOC, Chl-*a* 항목은 증가한 반면 전기전도도는 줄어들었다. 이는 수질 비교 기간의 강수량 차이에 기인한 것으로 추론할 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 2a) (Kwak, 2005). 수상태양광 설치 전 2년 동안 1726.9 mm의 강수량을 기록한 것에 비해 설치 후 2년 동안 2394.4 mm의 강수량을 보여 이 기간 동안 강수량이 약 40% 가량 증가하였다. 강수량의 증가로 인해 충주댐(청풍호) 전체에 총질소와 총인 등 영양염류 유입이 증가하였는데 최근 2년간 하절기 유해남조류의 세포수와 Chl-*a*의 농도 증가의 원인이 영양염류 유입으로 기인할 가능성이 있을 것으로 판단된다(Fig. 2b). 충주댐(청풍호)는 부영양화지수로 볼 때 중영양상태의 호수이다(Kwak, 2005). 본 연구와 마찬가지로 Rho (2014)가 합천호를 대상으로 물환경시스템의 합천호 수질측정망자료(2012~2013)를 참고하여 수상태양광 설

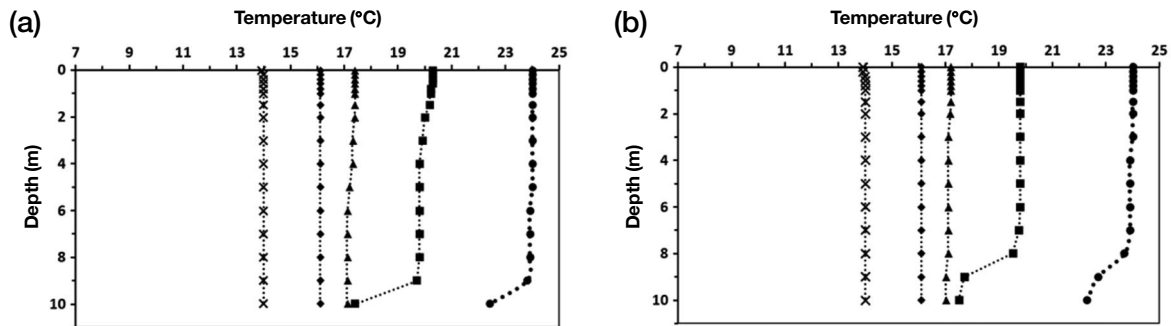
치 전과 후를 비교한 결과 수온과 용존산소량에서 큰 유의성을 나타내지 않았으며, 수상태양광이 합천호 수환경에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고하였다.

충주댐의 수상태양광 설치 공사 중인 2018년 5월 수질 조사결과를 보면 각 조사 지점별 COD는 2.5~3.4 mg L<sup>-1</sup>로, BOD는 0.8~1.5 mg L<sup>-1</sup>로, SS는 1.0~3.8 mg L<sup>-1</sup>로 조사되어 수상태양광시설에 의한 인근 수역의 수질에 큰 영향이 없는 것으로 보인다(Table 2). 특히 수상태양광 시설의 비영향권인 CJ1, 2, 3 세 지점의 동일 시기 수질 자료와 비교했을 때 유의미한 차이가 있다고 보기는 어렵다(Table 2). 수상태양광 시설의 운영 중인 2017년 12월에 측정된 수질 자료를 분석해 보면, 수체 내 유기물의 농도를 나타내는 COD는 2.5~2.8 mg L<sup>-1</sup>로, BOD는 1.3~1.6 mg L<sup>-1</sup>로, 부유물질(SS)는 2.6~4.4 mg L<sup>-1</sup>로 수상태양광 시설 비영향권인 세 지점에 비해 다소 낮은 것으로 조사되었

**Table 2.** Comparison of water quality parameters between FPV installed area and other sites.

Parameter	May 2017						November 2017					
	FPVC <sup>a</sup>	2L <sup>b</sup>	Ctrl <sup>c</sup>	CJ1 <sup>d</sup>	CJ2 <sup>e</sup>	CJ3 <sup>f</sup>	FPVC	2L	Ctrl	CJ1	CJ2	CJ3
COD (mg L <sup>-1</sup> )	2.8	2.6	3.4	5.86	2.76	2.6	2.8	2.5	2.5	2.46	3.5	2.3
BOD (mg L <sup>-1</sup> )	1.2	1	1.5	1.13	1.56	1.76	1.3	1.4	1.6	1.16	0.9	1.33
SS (mg L <sup>-1</sup> )	2.2	3.8	1.8	1	1.86	0.93	2.6	4.4	3.6	2.2	4.23	0.6
TOC (mg L <sup>-1</sup> )	0.5	1.6	1.6	1.93	1.13	1.23	2	2	2	2.16	1.73	2.16
TN (mg L <sup>-1</sup> )	1.7	1.64	1.44	2.31	2.11	2.22	2.12	2.24	2.21	2.3	2.27	2.29
TP (mg L <sup>-1</sup> )	0.01	0.02	0.03	0	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Chl- <i>a</i> (mg m <sup>-3</sup> )	ND	2.5	ND	0.36	1.53	1.23	4	4	4	3.36	2.6	2.66

<sup>a</sup>Center of the floating photovoltaic; <sup>b</sup>Sampling site double as far away as the length of longer side of the rectangular floating photovoltaic; <sup>c</sup>Sampling site quadruple as far away as the length of longer side of the rectangular floating photovoltaic; <sup>d</sup>Chungjau dam 1; <sup>e</sup>Chungju dam 2; <sup>f</sup>Chungju dam



**Fig. 4.** Water temperature profile of control (a) and FPVC (b) sites as a function of depth during the investigation period. The data is presented according to the sampling date: September (●), October (■), and 1<sup>st</sup> (▲), 2<sup>nd</sup> (◆), and 3<sup>rd</sup> (×) sampling in November 2018.

다. 수체 내 유기물의 농도를 나타내는 BOD, COD, TOC와 영양염류인 TN의 경우 수상태양광 시설 영향권과 비영향권과의 유의미한 차이는 없다고 판단되며, TP의 경우 수상태양광 시설 영향권이 비영향권에 비해 다소 높은 것으로 조사되었다. 지금까지의 모니터링 및 수질측정망의 자료를 바탕으로 볼 때, 충주댐 수상태양광 시설이 영향권과 비영향권의 수질을 악화시킨다고 보기 어려우며 장기적인 수질 모니터링을 통해 수상태양광 시설이 환경에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다고 생각된다. 기존 Rho (2014)와 Lee *et al.* (2017)의 결과도 본 연구의 결론과 유사한 분석 결과를 제시하였다. Rho (2014)가 합천호 내 100 kW와 500 kW 수상태양광 시설을 대상으로 2011~2012년, 2013~2014년 등 두차례 실시한 환경모니터링 결과 수상태양광 발전시설이 유의미한 수질 변화를 유발하지 않는 것으로 분석하였다. 최근 Lee *et al.* (2017)이 농업용 저수지인 금광저수지에 설치된 수상 회전식 태양광 발전시설이 수질에 미치는 영향을 차광구역과 비차광구역을 대상으로 조사 분석을 실시한 결과에 따르면, 두 측정지점 간의 수온, pH, DO, COD, TN, TP, Chl-*a*, 남조류 농도는 통

계학적으로 유의미한 차이가 없었다( $p > 0.05$ ). 결과를 종합해 보면, 수상태양광 설치 호소의 수질은 태양광 발전시설보다 해당 호소의 유역 및 수리수문학적 특성과 시공간적 변화에 더 큰 영향을 받을 것으로 판단된다.

## 2. 수상태양광 발전시설과 수체의 물리환경

수상태양광 발전시설물이 수체의 물리환경에 미치는 영향을 조사한 결과(Fig. 4), 1차와 2차 조사의 경우 FPVC와 대조구에서 수심 8~9m에서 수온 변화가 급격하게 나타나 수온약층(thermocline layer)을 형성하였다. 반면 3~5차 조사의 경우 표층, 중층, 하층 등 본 연구에서 측정한 수심에서는 뚜렷한 수온 변화가 확인되지 않아 전도현상(turnover)을 나타낸 것으로 관측되었다. 본 연구 결과는 기존 연구 결과와 일치한다. 기존 연구에 따르면, 충주댐(청풍호)의 수온약층은 4월 이후 나타나기 시작하며 수심별로 차이는 있으나 12월부터 전 수층이 완전히 혼합되는 것으로 확인되었다. Lee *et al.* (2017)이 금광저수지의 차광구역과 비차광구역의 수온을 조사한 결과 동일한 양상



**Table 3.** Dominant phytoplankton species as function of depth at the control and FPV installed.

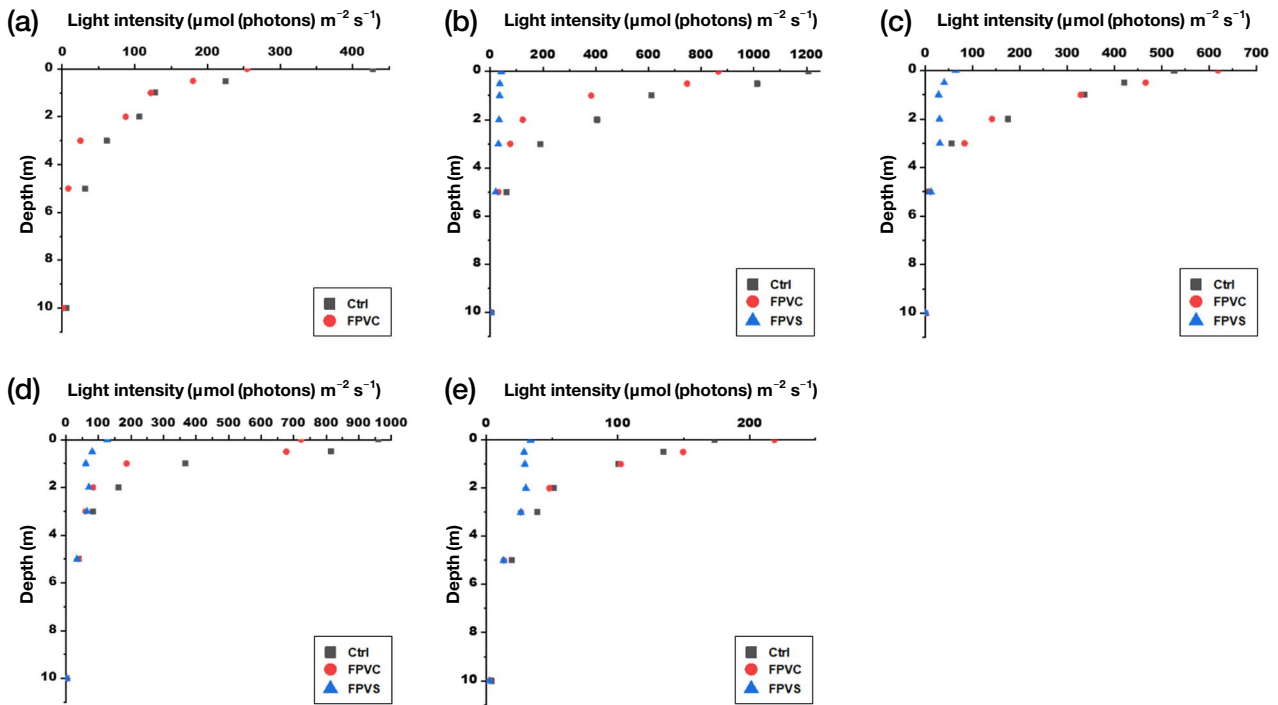
Site	Sampling round											
	1 <sup>st</sup>				2 <sup>nd</sup>				3 <sup>rd</sup>			
	Control (40 species)		FPVC (45 species)		Control (60 species)		FPVC (60 species)		Control (24 species)		FPVC (28 species)	
Depth (m)	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )
0	<i>Aphanocapsa</i> sp.	18,125	<i>Aphanocapsa</i> sp.	24,314	<i>Aulacoseira granulata</i>	116,478	<i>Lyngbya confervoides</i>	662,295	<i>Lyngbya confervoides</i>	30,467	<i>Aulacoseira granulata</i>	440,502
0.5	<i>Microcystis aeruginosa</i>	5,713	<i>Aphanocapsa</i> sp.	3,258	<i>Coenococcus planctonicus</i>	83,692	<i>Aulacoseira granulata</i>	44,704	<i>Aulacoseira granulata</i>	31,880	<i>Aulacoseira granulata</i>	1,157,143
1	<i>Aphanocapsa</i> sp.	6,183	<i>Chroococcus limneticus</i>	2,777	<i>Microcystis viridis</i>	100,513	<i>Aulacoseira granulata</i>	53,251	<i>Aulacoseira granulata</i>	31,407	<i>Aulacoseira granulata</i>	1,916,145
2	<i>Microcystis aeruginosa</i>	589	<i>Microcystis aeruginosa</i>	4,574	<i>Aulacoseira granulata</i>	61,642	<i>Cryptomonas ovata</i>	59,016	<i>Aulacoseira granulata</i>	16,687	<i>Aulacoseira granulata</i>	973,364
4	<i>Aphanocapsa</i> sp.	1,648	<i>Aphanocapsa</i> sp.	3,127	<i>Fragillaria crotonensis</i>	106,479	<i>Microcystis flos-aquae</i>	187,500	<i>Aulacoseira granulata</i>	13,780	<i>Aulacoseira granulata</i>	41,373
6	<i>Aphanocapsa</i> sp.	9,363	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	730	<i>Fragillaria crotonensis</i>	46,702	<i>Fragillaria crotonensis</i>	60,145	<i>Aulacoseira granulata</i>	41,068	<i>Aulacoseira granulata</i>	41,029
Site	4 <sup>th</sup>				5 <sup>th</sup>							
	Control (27 species)		FPVC (25 species)		Control (32 species)		FPVC (29 species)					
	Depth (m)	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )	Dominant species	Standing crop (cells L <sup>-1</sup> )					
0	<i>Oscillatoria curviceps</i>	8,912	<i>Aulacoseira granulata</i>	7,609	<i>Lyngbya confervoides</i>	7,990	<i>Aphanocapsa</i> sp.	1,449				
0.5	<i>Aulacoseira granulata</i>	11,230	<i>Aulacoseira granulata</i>	2,660	<i>Cryptomonas ovata</i>	2,424	<i>Lyngbya confervoides</i>	4,305				
1	<i>Aulacoseira granulata</i>	4,843	<i>Lyngbya confervoides</i>	8,358	<i>Cryptomonas ovata</i>	6,564	<i>Lyngbya confervoides</i>	4,420				
2	<i>Aphanocapsa</i> sp.	3,846	<i>Aulacoseira granulata</i>	7,075	<i>Cryptomonas ovata</i>	2,564	<i>Oscillatoria curviceps</i>	2,346				
4	<i>Aulacoseira granulata</i>	3,235	<i>Oscillatoria curviceps</i>	3,761	<i>Cryptomonas ovata</i>	2,567	<i>Oscillatoria curviceps</i>	2,439				
6	<i>Aulacoseira granulata</i>	3,702	<i>Aulacoseira granulata</i>	6,763	<i>Aphanocapsa</i> sp.	1,768	<i>Cryptomonas ovata</i>	1,435				

을 보였다. 수온은 계절적 변동에 따라 변화하였고 수상태양광 시설에 의한 차광 및 비차광구역의 수온 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 즉 시설물에 의한 일사량 유입 저하로 인한 수체의 수온 감소가 야기되지 않았다고 분석하였다(Lee and Lee, 2003). 약 0.5%의 금광저수지의 만수 면적을 차지하는 회전식 수상태양광 시설과 비교할 때 본 연구의 부분 폐쇄형 수상태양광은 고작 0.04%의 만수 면적만 차지하기 때문에 수체의 혼합을 감안하면 수온 감소가 없다고 보는 것이 타당하다.

5차에 걸친 수중 광도 조사 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 1차, 2차, 4차 조사 시 전반적으로 FPVC의 수중 광도가 대조구보다 낮게 나타난 반면, 3차와 5차의 경우 FPVC에서 오히려 대조구보다 높은 광도가 관측되었는데 이는 측정 시간의 차이(±1 hr)로 인한 운량 등에 따른 기인한 것으로 보인다. 수심별 광도 변화 양상은 전형적인 지수 광도 모

델을 따랐는데 FPVC와 대조구 모두 수심 3 m까지 급격하게 이후 완만하게 감소하였다. 수상태양광 발전시설에 의한 차광효과는 표층을 기준으로 24.7~40% 정도 있는 것으로 나타났으며 전체 수심별 광량을 기준으로 산술적으로 27~50%의 차광효과를 보였다. 특히 FPVC의 경우 대조구 대비 차광효과가 표층의 경우 최소 80% (5차)에서 최대 96% (2차)를 보였고 수심 3 m까지 두 조사 지점과 광량을 차이를 보이다 5 m 이후로는 광산란으로 거의 유사한 수치를 보였다. 수상태양광 발전시설의 수심별 광도 자료는 매우 제한적 이기는 하지만 33°의 경사각을 가진 부분 폐쇄형 SOLATUS 모델은 24~50%의 차광효과를 보인다고 할 수 있다.

대조구와 FPVC의 증발량산을 산출한 결과 각각 1차 18.1 mm day<sup>-1</sup>와 18.1 mm day<sup>-1</sup>, 2차 24.6 mm day<sup>-1</sup>와 22.8 mm day<sup>-1</sup>, 3차 7.3 mm day<sup>-1</sup>와 9.7 mm day<sup>-1</sup>, 4차 5 mm



**Fig. 5.** Irradiation intensity profile of sampling sites as a function of depth. The measurement was carried out on (a) September, (b) October, and 1<sup>st</sup> (c), 2<sup>nd</sup> (d), and 3<sup>rd</sup> (e) sampling of November 2018. Control was displayed as a black square, while FPV center (FPVC) and shaded (FPVS) as red circle and blue triangle.

**Table 4.** Ecological indices of phytoplanktons at the control and FPV installed sites.

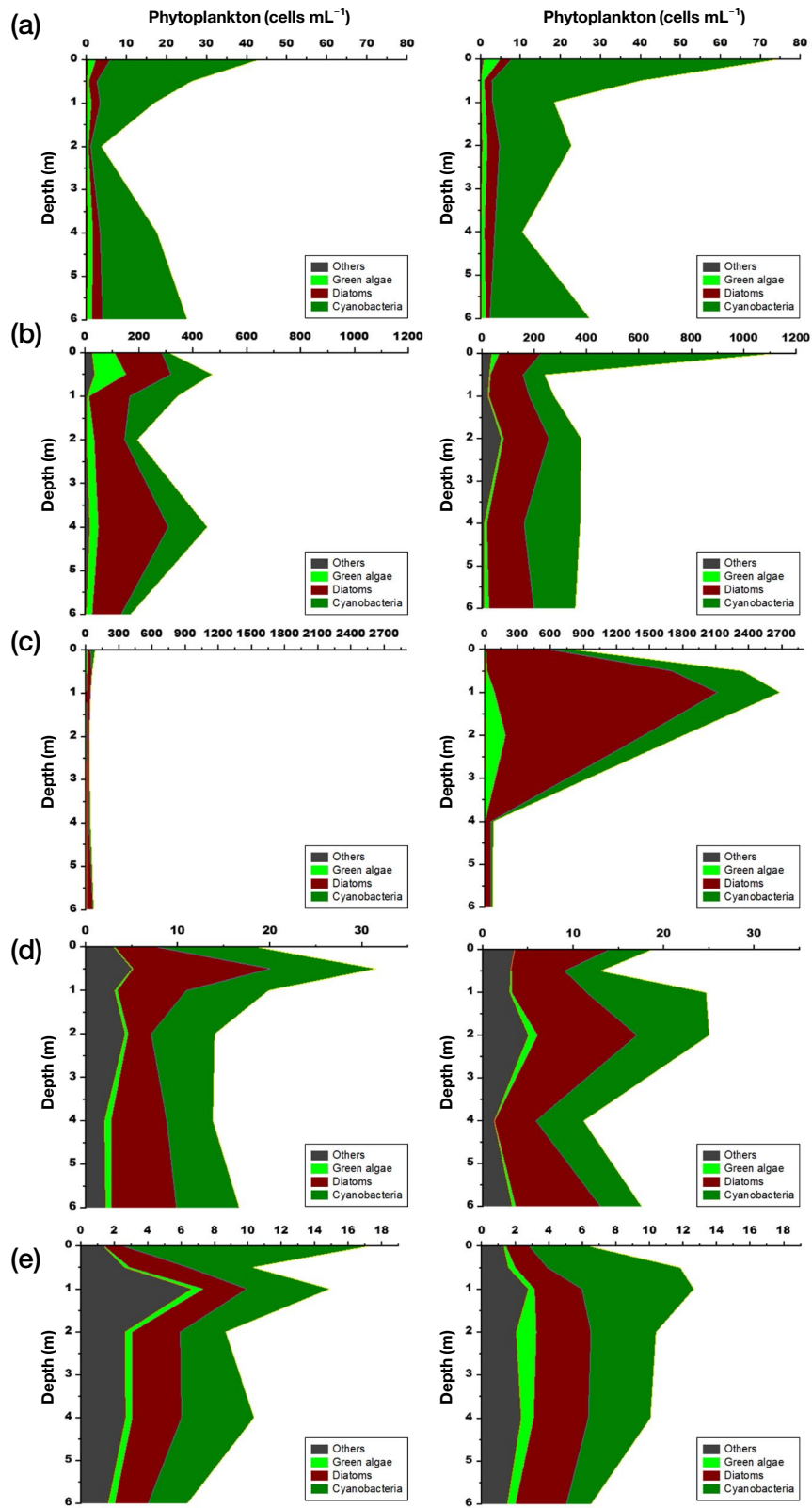
Station	Index	Sampling round				
		1st	2nd	3rd	4th	5th
Control	Diversity	0.92	1.2	0.83	0.96	1.02
	Evenness	0.58	0.67	0.59	0.66	0.68
	Richness	3.31	4.07	1.88	2.32	2.79
	Dominance	0.55	0.41	0.6	0.42	0.43
FPVC	Diversity	0.99	1.15	0.7	0.96	1.07
	Evenness	0.6	0.65	0.48	0.69	0.73
	Richness	3.61	3.98	1.7	2.07	2.55
	Dominance	0.51	0.39	0.71	0.44	0.35

day<sup>-1</sup>와 5.4 mm day<sup>-1</sup>, 5차 5.1 mm day<sup>-1</sup>와 10.6 mm day<sup>-1</sup> 이었다. 증발산량에 대한 독립표본 T검정 결과, p값이 0.8035로 유의한 수준에서 차이가 없었다.

### 3. 조류 군집 분석

수상태양광 발전시설 설치 인한 조류의 군집 변화를 알아보기 위해 대조구와 FPVC 두 지점의 수심별 조류 군집 구조를 조사하였다. 조사 결과를 Tables 3과 4, Fig.6에

정리하였다. 상술한 대로 대조구와 FPVC 지점의 수온 변화는 거의 없으며 광도의 차광효과에서만 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 조류 군집 변화는 광도에 기인한 것으로 판단하여도 무방할 것이다. 대조구의 경우, 1차에서 40종, 2차에서 60종, 3차에서 24종, 4차에서 27종, 5차에서 32종이 나타났다. 우점종은 1차에서 *Aphanocapsa* sp., 2차, 3차, 4차에서 *Aulacoseira granulata*, 5차에서 *Lynbya confervoides*로 나타났다. FPVC에서는 1차에서 45종, 2차에서 60종, 3차에서 28종, 4차에서 25종, 5차에서 29종이 나타났다. 우점종은 1차에서 표층에서 *Aphanocapsa* sp., 2차에서 *L. confervoides*, 3차와 4차에서 *A. granulata*, 5차에서 *Lynbya confervoides*로 나타났다. 수심별 현존량을 살펴보면 1차에서 대조구와 FPVC 모두 표층에서 가장 높았으며, 2차에서는 대조구는 0.5 m와 4 m에서 거의 비슷한 최대 현존량을 보인 반면 FPVC는 표층에서 현존량이 가장 높았다. 3차의 경우 대조구에 비해 FPVC에서 높은 현존량을 보였는데 규조류가 대부분을 차지하였다. 4차에서 대조구의 경우 0.5 m에서 최대 현존량을 보였고 FPVC에서는 1 m와 2 m에서 현존량이 가장 높았다. 생태지수의 경우 5차례 조사 중에서 3차를 제외하고 비슷한 양상을 보였다. 3차 조사의 경우 FPVC에서 우점종



**Fig. 6.** Algae assemblage of control and FPVC sites as a function of depth. Sampling and identification were carried out on (a) September, (b) October, and 1<sup>st</sup> (c), 2<sup>nd</sup> (d), and 3<sup>rd</sup> (e) sampling of November 2018. Control samples were displayed on the left panel, while FPVC center (FPVC) samples displayed on the right.

인 구조류의 현존량이 상대적으로 높아 균등도가 낮게 나타나며 현존량 또한 유의 수준( $p < 0.05$ )에서 차이가 있는 것으로 분석되었다. 수심에 따른 조류의 군집을 수체의 물리 환경과 연관지어 분석하면, 차광효과가 있는 FPVC 지점에서는 대조구에 비해 표층에서 조류들이 상대적으로 더 많이 관찰된다고 할 수 있다. 하지만 차광의 정도가 높지 않기 때문에 광합성 조류의 성장과 군집구조는 대조구와 유사한 것으로 나타났다. 회전식 수상태양광의 경우에도 조사기간 중 7월의 경우를 제외하고 Chl-*a*와 남조류가 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다(Lee *et al.* 2017). 본 연구의 3차 조사와 유사하게 7월의 경우 비차광구역보다 차광구역에서 Chl-*a*와 남조류의 농도가 다소 높았는데 저수량 감소와 시설물에 의한 정체 수역 발생으로 인한 부착조류 등의 발생을 원인으로 제시하였다. 본 연구의 3차 조사의 경우에 부착성 구조류인 *Aulacoseira granulata*가 우점종으로 나타났는데 이 또한 발전시설에 의한 정체 수역 발생과 관련이 있을 것으로 판단된다. 이런 현상은 국부적인 기상 환경과 영양염류 유입 특성 등과 연동되어 있는 것으로 판단해야 옳은 것이다. 최근 Yamamich *et al.* (2018)이 최대 수심 2m의 인공 연못에서 수행한 실험에서 차광으로 조류의 발생이 더 증가한다고 보고하면서 이는 조류와 침수식물이 빛과 영양염류를 위해 경쟁하게 되는데 낮은 광도에서 조류가 더 효율적으로 성장하므로 부분적인 차광효과는 조류 발생을 야기할 수 있다고 주장하였다. 충주댐(청풍호)는 평균 수심이 32 m로 침수식물은 서식하지 않는 것으로 알려져 있다(Ahn and Ryu, 2006; Cho and Cho, 2015). 따라서 위 연구 결과를 수심이 깊은 충주댐의 수상태양광 설치 지점에 적용하여 설명하기에는 무리가 있다고 판단된다. 다만 광도가 높은 하계 기간 동안 수상태양광 혹은 유사 시설물에 의한 차광효과는 강한 빛에 의한 광저해 현상을 완화하여 표층에서 조류의 성장에 유리하게 작용할 가능성이 있다. 그리고 이로 인해 국부적인 조류 군집 변화가 유도될 수 있다(주진철, 2016). 더욱이 국내 수상태양광 시설은 설치 면적이 전체 만수 면적에 비해 1% 미만이며, 완전 폐쇄형이 아닌 부분 폐쇄형으로 차광효과가 해외의 타 설비에 비해 낮다고 볼 수 있다. Lee *et al.* (2017) 과 본 연구를 통해 수상태양광 시설물이 조류 군집 구조에 일시적이며 국부적인 변화를 유도할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 변화에 기여하는 요소는 시설물에 의한 부분적 광차단으로 인한 광저해 현상 감소와 수체의 흐름 변화 등으로 볼 수 있다. 하지만 현재까지 수상태양광 발전시설이 수질 및 수생태계에 미치는 영향 연구는 국내외적으로 매우 제한적이며 연구 기간도 단기간에 그치고 있어 수상태양광과 관련된 쟁점에 대한 과학적

검증 부족이라는 한계가 있다는 점을 밝혀둔다. 따라서 향후 다양한 설치 면적의 수상태양광에 장기적인 수질 및 수생태계 모니터링과 발전시설에 의한 수체 거동 특성에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

## 적 요

본 연구는 충주댐(청풍호)의 부유식 수상태양광 발전 시스템(FPV)이 수질에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 충주댐(청풍호) FPV는 수표면적(97 km<sup>2</sup>)의 0.04%를 차지한다. FPV 설치 전후 호수 전체의 수질을 비교·분석하였다. 전체 호수의 DO, BOD, TOC 및 Chl-*a*는 설치 기간 후 유의한 수준( $p < 0.05$ )에서 증가한 반면, 전기전도도는 감소하였다. 이는 동일한 비교 기간 동안 40% 증가한 강수량으로 인해 영양염류 유입이 증가한 때문으로 판단된다. 또한 2017년 5월과 11월 FPV 중앙 직하부(FPVC) 및 영향권 지점에서 수질 인자를 측정·비교하였다. 그 결과, FPVC와 영향권 지점의 수질 인자가 통계적으로 다르지 않았으며( $p > 0.05$ ), FPV 시설이 수질 저하를 유발하지 않음을 보여주었다. 2018년 9월부터 11월까지 5차례에 걸쳐 수온, 광도 및 식물 플랑크톤 군집도 수심별로 측정·분석하였다. 수온은 지점별로 다르지 않았으며, 광도는 FPVC에서 27~50%로 감소한 것으로 조사되었다. 대조구와 비교해보면 감소된 광도에도 불구하고 FPVC에서 조류의 출현종과 현존량이 유의미하게 다르지 않았다( $p > 0.05$ ). 그러나, 11월 초의 시료의 경우, FPVC에서 *Aulacoseira* 속에 속하는 부착 구조류가 우점하였으며 대조구보다 현존량이 상당히 높았다. 이는 FPV 시스템에 의한 일시적이고 국부적인 정체 수역 형성과 관계있을 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 향후 수상태양광 설치에 관한 정책수립에 필요한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 수상태양광 시설에 대한 장기적인 수질 모니터링과 수상태양광 시설에 의한 수리동역학적 연구, 수상태양광의 설치 면적과 수질과의 상관관계 연구 등이 필요하며 이를 통해 수상태양광 활용성을 극대화시킬 수 있을 것으로 보인다.

**저자정보** 김학준(부경대학교 화학과 부교수), 곽석남((주)환경생태공학연구원 대표이사), 윤민(부경대학교 응용수학과 교수), 김일규(부경대학교 환경공학과 교수), 김동섭(K-water 수석연구원)

**저자기여도** 개념설정: 김동섭, 김영성, 김학준, 방법론 및 분석: 김학준, 윤민, 곽석남, 김일규, 자료제공 및 관리: 김동섭, 김영성, 김학준, 곽석남, 김일규, 원고 초안작성: 김학

준, 원고 교정: 김학준, 윤민, 박석남, 김일규, 김동섭, 원고 편집: 김학준, 윤민, 박석남, 김일규, 김동섭, 과제관리: 김동섭, 김영성, 연구비 주주: 김동섭, 김영성

**이해관계** The authors declare no conflict of interest and the sponsors had no role in the design, execution, interpretation, or writing of the study.

**연구비** 그림 및 자료 정리에 일부 도움을 준 Shweta Borkar 에게 감사드립니다. 본 연구는 한국수자원공사의 “수상태양광의 수생태계에 미치는 영향조사(2018)”의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Ahn, K.-H. and J.-G. Ryu. 2006. A study of flora on Chungju Lake Area. *Korean Journal of Nature Conservation* **4**(3): 187-200.
- Cho, H. and K.-H. Cho. 2015. Difference in shoreline flora according to the usage of reservoirs in Korea. *Journal of Wetlands Research* **17**(4): 339-347.
- Choi, Y.-K. 2014. A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact. *International Journal of Software Engineering & its Applications* **8**(1): 75-84.
- Dalton, J. 1802. Experimental essays on the constitution of mixed gases: on the force of steam or vapour from water or other liquids in different temperatures, both in a Torricelli vacuum and in air; on evaporation; and on expansion of gases by heat. *Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester* **5**: 536-602.
- IEA. 2018. Renewables information. p.3.
- Joo, J.C., N.J. Heo, S.H. Choi and S.H. Lee. 2018. Current status of floating photovoltaic solar system worldwide and their issues. *Water and Future* **51**(11): 34-41.
- K-water. 2012. Fundamental studies on floating photovoltaic system (2<sup>nd</sup> year)
- KEA. 2019. <https://www.knrec.or.kr/pds/statistics.aspx>
- KRCC. 2017. Studies on the effect of utilization of water surface of agricultural reservoir on aquatic ecosystem (I). Korea Rural Community Corporation, Korea.
- KRCC. 2018. Studies on the effect of utilization of water surface of agricultural reservoir on aquatic ecosystem (II). Korea Rural Community Corporation, Korea.
- Kwak, S.J. 2005. Limnological and ecological study of Lake Chungju. MS thesis. Samyook University.
- Lee, I., J.C. Joo, C.S. Lee, G.Y. Kim, D.Y. Woo and J.H. Kim. 2017. Evaluation of the water quality changes in agricultural reservoir covered with floating photovoltaic solar-tracking systems. *Journal of Korean Society of Environmental Engineering* **39**(5): 255-264.
- Lee, S.H. and I.H. Cho. 2018. Global policy trends in new and renewable energy and market analysis. Korea Energy Economics Institute, Korea.
- Lee, Y.W. and H.Y. Lee. 2003. Effects of light-blocking on water quality and phytoplankton community in Lake Juam. *Korean Journal of Limnology* **36**(2): 150-160.
- Liu, H., V. Krishna, J.L. Leung, T. Reindl and L. Zhao. 2018. Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics. *Progress in Photovoltaics* **26**(12): 957-967.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *International Journal of General Systems* **3**: 36-71.
- Pielou, E. 1966. The measurement of diversity in different type of biological collections. *Journal of Theoretical Biology* **13**: 131-144.
- REN21. 2018. Renewables 2018 Global Status Report. p.18-27.
- Rho, T.H. 2014. Environmental monitoring of floating photovoltaic system and evaluation of its environmental safety. K-water, Korea.
- Sahu, A., N. Yadav and K. Sudhakar. 2016. Floating photovoltaic power plant: a review. *Renewable & Sustainable Energy Review* **66**: 815-824.
- Shannon, C.E. and W. Wiener. 1963. The mathematical theory of communication. Urbana, IL: University of Illinois Press, 127 pp.
- Yamamichi, M., T. Kazama, K. Tokita, I. Katano, H. Doi, T. Yoshida, N.G. Hairston and J. Urabe. 2018. A shady phytoplankton paradox: when phytoplankton increases under low light. *Proceedings of The Royal Society B* **285**: 20181067.