수상 회전식 태양광 발전시설 설치에 따른 농업용 저수지의 수질변화 평가

Evaluation of the Water Quality Changes in Agricultural Reservoir Covered with Floating Photovoltaic Solar-Tracking Systems

이인주 · 주진철*[†] · 이창신* · 김가영* · 우도영** · 김재학**

Inju Lee · Jin Chul Joo*[†] · Chang Sin Lee*

Ga Yeong Kim* · Do Young Woo** · Jae Hak Kim**

한밭대학교 환경공학과 · *한밭대학교 건설환경공학과 · **^(주)솔키스

Department of Environmental Engineering, Hanbat National University

*Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University · **Solkiss Inc.

(Received March 8, 2017; Revised March 20, 2017; Accepted April 4, 2017)

Abstract : To evaluate the water quality changes in agricultural reservoir covered with floating photovoltaic solar-tracking systems, the water quality variations with time and depth were monitored on both six sites for light blocking zones and four sites for light penetration zones after the installation of floating photovoltaic solar-tracking systems in Geumgwang reservoir at Anseong-si, Kyeonggi province. For one year with 16 monitoring events, water quality parameters [i.e., water temperature, pH, dissolved oxygen (DO), chlorophyll-*a* (Chl-*a*), and blue-green algae (BGA)] were monitored at depths of 0.3 m, 1 m, 3 m, and 5 m, while chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were monitored at depths of 0.3 m. Statistically, the difference in all water quality parameters was not significantly different ($p > 0.05$) at the level of significance of 0.05. Based on these results, the water quality data from light blocking zones (site 1~6) and light penetration zones (site 7~10) were clustered, and were compared with time and depth. As a result, the difference in water temperature, pH, DO, COD, TN, TP, Chl-*a*, and BGA between light blocking zones and light penetration zones was not significant ($p > 0.05$) with different time and depth. For Chl-*a* and BGA, some data from light blocking zones greater than light penetration zones were temporary observed due to the severe drought, low water storage rate, and over growth of periphyton. However, this temporal phenomenon did not impact the water quality. Considering the small water surface area ($\leq 0.5\%$) covered by floating photovoltaic solar-tracking systems, the mixing effect of whole Geumgwang reservoir caused by Ekman current and continuous discharge were more dominant than the effect of reduced solar irradiance. Further study is warranted to monitor the changes in water quality and aquatic ecosystems with greater water surface area covered by floating photovoltaic solar-tracking systems for a long time.

Key Words : Agricultural Reservoir, Floating Photovoltaic Solar-Tracking Systems, Water Quality Change, Solar Irradiance, Algae, Light Blocking

요약 : 본 연구는 수상 태양광 발전시설의 설치로 인한 농업용 저수지의 수질변화를 평가하기 위해 경기도 안성시 금광저수지에 위치한 수상 회전식 태양광 발전시설에서 발전시설 설치에 따른 차광구역 6지점과 비차광구역 4지점을 선정하여 1년 동안 총 16회에 걸쳐 차광으로 인한 수질변화를 시간과 수심 별로 분석하였다. 이를 위해 수온, pH, DO, Chl-*a*, BGA 항목을 0.3 m, 1 m, 3 m, 5 m의 수심별로 측정하고, 표층의 시료를 채수하여 COD, TN, TP 항목을 분석하였다. 연구결과, 금광저수지 내 10곳의 측정지점 간의 관측된 전 수질항목에서 차이는 유의확률(p -value) 0.05 이상으로 유의수준($\alpha=0.05$)에서 서로 다르지 않다고 통계학적으로 분석되었다. 이러한 결과를 토대로 측정지점을 차광구역(site 1~6)과 비차광구역(site 7~10)으로 그룹화 후 시간 및 수심에 따른 변화를 확인하였다. 차광구역과 비차광구역 간의 수온, pH, DO, COD, TN, TP, Chl-*a*, BGA의 계절 및 수심에 따른 차이는 유의한 수준에서 통계학적으로 다르지 않았다($p > 0.05$). Chl-*a*와 BGA의 경우, 7월에 비차광구역보다 차광구역에서 일부 높은 농도가 관측되었으나 이는 기록적인 가뭄과 낮은 저수량, 발전시설 구조물에 부착된 부착조류의 과다성장으로 인한 일시적 현상으로 전체 수질은 통계학적으로 유의할 만한 차이가 없는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 수상 회전식 태양광 발전시설의 설치로 인한 저수지 수면의 차광이 전체 수면적 대비 0.5% 미만으로 일사량 유입 감소 효과는 취송 및 방류를 통한 저수지 수체의 혼합 효과 대비 미미했기 때문인 것으로 판단된다. 향후, 수상 태양광 발전시설 설치로 인한 수질변화를 면밀히 연구하기 위해서는 보다 넓은 면적의 태양광 발전시설의 설치로 인한 차광과 함께 장기적인 수질 및 수생태계 관측이 필요할 것으로 판단된다.

주제어 : 농업용저수지, 수상 태양광 발전시설, 수질변화, 일사량, 조류, 차광

1. 서론

화석연료(fossil fuel)의 무분별한 사용으로 인한 자원의 고갈과 이에 따른 환경문제가 대두되면서 지속가능한 신재생

에너지가 화석연료의 대안으로 떠오르고 있다.^{1,2)} 신재생에너지 중 원자력 에너지는 타 발전 대비 경제성이 좋아 각광을 받았으나, 일본 후쿠시마 원전사고 이후 안전성을 염려한 많은 국가에서 원자력 발전 사업을 회피하고 있어³⁾ 원자

[†] Corresponding author E-mail: jincjoo@hanbat.ac.kr Tel: 042-821-1264 Fax: 042-821-1476

력 대비 비교적 발전량과 위해성의 예측이 가능하며 빠른 설치 및 시공 등의 장점이 있는 태양광 발전 시설(photovoltaic systems)의 설치가 확대하고 있다.²⁾ 우리나라의 경우, 2000년대 초 유가급등으로 인해 에너지자원 확보 경쟁에 돌입한 정부가 신·재생에너지 관련 사업을 위한 지원 법령을 마련하고 이를 지속적으로 추진해 오고 있으며,⁴⁾ 2012년부터는 일정 규모 이상의 발전사업자에게 총 발전량 중 일정량 이상을 신·재생에너지로 공급하도록 의무화하는 신·재생에너지 의무 할당제(renewable portfolio standards, RPS)를 도입하여 태양광 발전시장의 확대를 장려하였다.⁵⁾ 이에 따라, 현재 태양광 발전 사업은 점차 증가하여 전체 신·재생 에너지 사업 중 업체수(28%), 고용인원(52%), 매출액(63%), 수출액(79%), 투자액(45%) 모두 가장 큰 비중을 차지하게 되었으며 그 규모가 지금도 꾸준히 증가하고 있다.⁶⁾

그러나, 육상 태양광 발전시설은 그 의도가 친환경임에도 불구하고 탄소 흡수원인 산림자원의 감소와 생태계 훼손, 토사 유출, 경관 악화 등의 환경문제를 야기 시키며 신·재생 에너지의 취지인 친환경성을 퇴색시킨다는 문제점이 보고되고 있다.⁷⁾ 이러한 육상 태양광 발전시설(overland photovoltaic systems)의 문제점을 최소화하고자, 육상 태양광 발전시설을 수상(floating photovoltaic systems)으로 옮기는 방안이 새로운 대안으로 떠오르고 있다.^{7,8)} 즉, 수상 태양광 발전시설을 활용도가 낮은 호소 등의 수면에 설치하기 때문에 자연환경 훼손에 대한 우려 없이 대규모 부지확보가 용이하며, 수면의 냉각효과 및 난반사로 인하여 육상 태양광 발전시설 대비 약 10% 이상 발전효율이 높은 것으로 보고되고 있다.^{7,9)} 또한, 발전시설의 설치로 인하여 수면의 일사량(solar radiation)을 차단하여 녹조현상(green tide)을 완화시키고, 물고기들의 서식처(habitats) 및 산란환경을 조성시키는 데 유리한 이점을 가지고 있는 것으로 예측된다.¹⁰⁾

그러나 수상 태양광 발전시설의 과도한 밀집형 설치와 임대 중심의 사업운영으로 인한 유지관리 미비, 그리고 수상 태양광 발전시설의 설치로 인해 유입되는 일사량의 저하 및 발전시설 구조물로 인한 수질오염 및 수생태계 교란 등의 악영향에 대한 우려가 지속적으로 제기되고 있다. 하지만 현재까지 수상 태양광 발전시설 설치로 인한 수질 및 수생태계 변화를 수상 태양광 발전시설이 구축된 호소에서 1년 이

상 장기적으로 관측한(monitoring) 현장기반 실증형 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 농업용 저수지 저면 암반층에 고정된 중심축을 중심으로 부유체 전체를 회전시키는 수상 회전식 태양광 발전시설(floating photovoltaic solar-tracking systems)의 설치로 인한 수체 내 유입 일사량의 저하와 구조물로 인한 수류변화 및 정체 등이 농업용 저수지의 수질에 미치는 영향을 현장에서 1년 동안 장기적으로 조사하였다. 이를 위해, 수상 태양광 발전시설로 인해 광이 차광되는 차광구역(light blocking zone)과 수상 태양광 발전시설의 영향이 없는 비차광구역(light penetration zone)의 수질변화를 장기적으로 관측한 후 다양한 수질인자별 변화를 통계학적으로 분석하여 수상 태양광 발전시설의 설치에 따른 농업용 저수지의 수질변화를 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구대상지

본 연구의 대상지는 경기도 안성시 금광저수지 내 수상 회전식 태양광 발전시설로 대상 수체인 금광저수지는 사흥천, 옥정천, 한운천 등이 주요 유입 하천으로 구성된 농업용 저수지이다.¹¹⁾ 수상 회전식 태양광 발전시설은 사흥천 유입부에 위치하고 있으며 저수지 만수면적(1,520,000 m²)의 약 0.5%, 관측 기간 중 최저 저수율(24.8%)의 약 1.9%인 7,500 m²의 면적을 점유하고 있으며, 저수지 바닥 암반층(화강암)까지 굴착해 중심축을 설치하고, 그 중심축을 지지수단으로 하여 부상체를 연결한 후 발전시설을 설치하는 방식으로 약 1,600장의 모듈로 구성되어 있다.¹²⁾

수상 회전식 태양광 발전시설은 부상체 전체가 중심축을 지지수단으로 하여 태양을 따라 실시간으로 회전하며 수면의 난반사와 음영간섭이 최소화되어 지상고정식 대비 22%, 수상고정식 대비 17% 정도 발전 효율이 개선된 시스템이다.¹²⁾ 또한, 수중에 설치된 부력재가 태양을 따라 회전해 수체를 순환시켜 수질 개선효과와 발전 시설물로 인한 차광으로 수온 상승 억제를 통해 녹조발생 저감을 기대할 수 있는 발전시설이다.

Fig. 1. The conceptual design (a) and pictorial view (b) of floating photovoltaic (PV) solar-tracking systems evaluated in this study.

2.1.1. 금광저수지 유역 현황

금광저수지는 경기도 안성시 금광면 금광리에 위치한 농업용수를 저장·공급하기 위해 축조된 인공호로 유역면적 4,830 ha, 저수량 12,095,000 m³, 관개면적 1,245 ha로 비교적 규모가 큰 농업용 저수지이다.¹¹⁾ 금광저수지 인근 유역은 토지계 유역면적의 비가 가장 높은 곳으로 인근에 위치한 소규모 마을과 유락시설에서 배출되는 미처리된 일부 생활계 오염원과 토지계와 축산계에서 배출되는 비점오염원이 저수지로 유입되고 있는 것으로 보고되고 있다.¹³⁾

2.1.2. 금광저수지의 수질현황(2011~2015년)

2011년부터 2015년까지 최근 5년간의 수질측정망자료¹⁴⁾를 분석한 결과, 금광저수지의 수질은 호소수 수질환경기준 IV등급으로 농업용수로 사용하기 적절한 것으로 조사되었다.¹⁵⁾ 최근 5년간 금광저수지의 수온은 5년 평균 $16.1 \pm 1.9^\circ\text{C}$ 로 수온 변화는 계절적 변화가 뚜렷하고, 매년 유사한 주기성(periodicity)을 나타내고 있다. pH 값은 5년 평균 8.0 ± 0.1 로 변화 폭이 크지 않았다. 화학적 산소요구량(COD)의 평균은 $5.8 \pm 0.5 \text{ mg/L}$ 로 다양한 요인과 계절적 영향에 의해 비교적 큰 변화 폭을 보이고 있으나, 일반적으로 여름철 저수율이 감소함에 따라 COD 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 부유물질(SS) 농도는 평균 $5.4 \pm 0.8 \text{ mg/L}$ 로 강우 사상에 따라 편차가 큰 것으로 조사되었으며, 계절적 주기성과 반복성(repeatability)을 확인할 수 없었다. 주요 영양염류인 총질소(TN)와 총인(TP)의 평균은 각각 $1.68 \pm 0.1 \text{ mg/L}$, $0.04 \pm 0.006 \text{ mg/L}$ 로, 영양염류의 농도는 2011년을 제외한 2012~2015년 동안 통계학적으로 유사한 농도를 나타냈으며, 금광저수지 유역의 오폐수배출시설의 고도화와 축산폐수의 수거 및 처리를 통한 재이용으로 영양염류의 농도는 점차 감소하는 추세인 것으로 분석되었다.¹⁵⁾ Chl-*a*의 평균은 $17.7 \pm 3.8 \text{ } \mu\text{g/L}$ 로 영양염류 농도 변화에 일부 영향을 받는 것으로 조사되었으며, 5년 평균 Chl-*a* 농도가 호소수 수질환경기준 III 등급으로 금광저수지 내 조류농도는 유사규모의 다른 농업용 저수지 대비 다소 낮은 것으로 조사되었다.

Table 1. Various water quality parameters and measurement methods at different water depth profiles

Parameters	Water depth				Method
	0.3 m (water surface)	1 m	3 m	5 m	
Water temp.	○	○	○		Field measurement
pH	○	○	○		
DO	○	○	○		
Chl- <i>a</i>	○	○	○	○	
BGA	○	○	○	○	
COD	○				Laboratory measurement
TN	○				
TP	○				

2.2. 측정 및 현장 채수 위치

수상 회전식 태양광 발전시설의 설치로 인한 차광 및 일사량의 수체 내 유입 저하가 수질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 패널 중심을 기준으로 반경 300 m 내외에서 빛이 차단되는 차광구역(light blocking zone, site 1~6) 6지점과 비차광구역(light penetration zone, site 7~10) 4지점을 선정하여 GPS 좌표를 이용해 동일 지점에서 1년 동안 수질을 장기적으로 측정 후 측정결과를 통계학적으로 분석하였다. 측정항목은 수온(water temperature), pH, 용존산소(dissolved oxygen, DO), 조류농도(chlorophyll-*a*, Chl-*a*와 blue-green algae, BGA)를 0.3 m(표층), 1 m, 3 m의 수심별로 각각 현장에서 측정하였으며(Chl-*a*와 BGA는 수심 5 m 추가 측정), 기타 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 총질소(total nitrogen, TN), 총인(total phosphorous, TP) 분석을 위해 차광구역(site 1~3) 3지점과 비차광구역(site 7, 8, 10) 3지점의 표층에서 시료를 채수하였다(Table 1).

2.3. 차광에 의한 수질 변화 측정 및 분석 방법

수질 측정 및 분석은 1월부터 11월에 걸쳐 총 16회 실시하였으며, 월 1회를 기준으로 하되 수온이 상승하기 시작해

Fig. 2. Pictorial view of floating photovoltaic (PV) solar-tracking systems and ten sampling sites for measurement and analysis of various water quality parameters.

조류 과다성장이 예상되는 5월~8월 동안은 주 2회 이상 광량이 높은 오후 1~3시 사이에 시행되었다. 현장 측정은 휴대용 수질측정기를 이용하여 1분 동안 측정한 값의 평균을 활용하였다. 측정기기로는 Multi 3420 Multiparameter (WTW, Cole-Parmer Co.)를 이용해 수상 회전식 태양광 발전시설의 패널로 인하여 광량이 차단된 차광구역 6지점과 비차광구역 4지점에서 수온, pH, DO를 수심 별(0.3, 1, 3 m)로 측정하였으며, Chl-*a*와 BGA는 Modern water사의 조류 측정기(Modern water algae check)를 사용하여 0.3, 1, 3, 5 m의 수심 별로 측정하였다.

실험실 내 정밀 분석을 위해서 현장에서 1 L 무균 채수병을 이용해 비교적 농도변화가 뚜렷한 표층수 시료(0.3 m)만 채수하여 실험실로 신속히 운반 후 평균 2회 분석을 실시하였으며, 실험실로 운반한 시료는 수질오염공정시험기준¹⁷⁾을 토대로 COD는 과망간산칼륨법, TN은 자외선 흡광광도법, TP는 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다.

2.4. 통계 분석

수상 회전식 태양광 발전시설 설치로 인한 농업용 저수지의 수질 변화를 평가하기 위해 차광구역(site 1~6) 6지점과 비차광구역(site 7~10) 4지점, 총 10지점의 표층 데이터를 각 조사지점 별로 기술통계(descriptive statistics)를 수행하고, 수질 자료 분포의 대칭성과 중심위치, 산포의 정도 등을 파악하기 위해 Box 그래프를 활용하여 하단에서부터 5%, 25%, 75%, 95%, 중앙값(흑선), 평균값(백선)으로 나타내었다. 또한, 모집단 간의 전반적인 차이를 검정하기 위해 2개 이상 모집단의 평균을 비교하는 통계적 검정방법인 일원분산분석(one-way ANOVA)을 통하여 16차례에 걸쳐 수집한 동일한 수질항목(종속변수)간의 지점(독립변수)별 차이가 있는지를 통계학적으로 검증하였다.

통계프로그램인 SPSS (ver. 22.0)을 이용하여 ANOVA를 진행하였으며, 지점별 수질항목간의 통계학적 차이가 발생할 경우, Scheffé 검정법을 이용하여 사후검정을 실시하였다. 먼저 ‘수질인자들의 조사지점별 값은 통계학적 유의한 수준($\alpha = 0.05$)에서 다르지 않다’인 귀무가설($H_0: \mu_{st.1} = \mu_{st.2} = \mu_{st.3} = \mu_{st.4} \cdots \mu_{st.10}$)을 설정 후, ANOVA를 통하여 각 수질인자들의 귀무가설 검증을 실시하였다.^{18,19)}

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 금광저수지의 기후 현황(2015년)

조류성장에 영향을 미치는 기온(temperature)과 일사량(radiation), 강수량(precipitation) 등의 기상자료는 금광저수지 인근의 수원기상대의 자료를 활용하였다.²⁰⁾ 조사기간인 2015년 금광저수지의 평균기온은 13.5℃로 평년 대비 1.5℃ 높았으며, 일조시간은 총 2450.3 hr로 평년 대비 287.5 hr 높았다. 강수량은 총 751.1 mm로 평년 대비 561.2 mm 낮았으며, 7월에 64.7 mm/day로 하루 중 가장 많은 강수량을 나

Fig. 3. (a) Precipitation, (b) solar irradiance, and (c) water storage rates of Geumgwang agricultural reservoir in 2015.

타냈다(Fig. 3(a)). 일사량은 계절별 큰 편차를 나타냈으며, 하루 최대 강수량을 나타낸 7월 29일을 제외하고는 평년 대비 큰 변화를 나타내지 않았다(Fig. 3(b)). 저수율(water storage rate)은 관개기 이전에는 평년값과 유사하였으나, 2015년의 기록적 가뭄과 농업용수의 지속적 공급으로 인해 5월 이후 저수율이 급격하게 감소하였다(Fig. 3(c) 참조). 9월 강수량의 증가로 인해 저수율이 일부 증가하였으나 가뭄과 농업용수의 지속적 공급으로 다시 감소한 것으로 조사되었으며 평년 대비 저수율의 편차가 매우 증가해 수체의 혼합이 지속적으로 이뤄졌을 것으로 판단된다.

3.2. 조사지점 수질 모니터링 결과(2015년)

금광 저수지의 조사지점(10지점) 및 수심별 다양한 수질인자의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차, 변동계수를 Table 2에 요약하였다. 수질 분석 항목(COD, TN, TP) 중 4지점(site 4, 5, 6, 9)의 자료는 채수 시료의 부재로 분석을 진행하지 못하였으며, 해당 자료를 제외하고 통계 분석을 진행하였다. 각 조사지점 별 수온의 평균은 $19.7 \pm 0.03^\circ\text{C}$ 이며, 최대값과 최소값 모두 유사한 값을 나타냈다. pH의 평균은 8.7 ± 0.005 이며, 조사지점별 편차도 비교적 낮아 모두 약알칼리성 상

Table 2. Descriptive statistics of various water quality parameters at each site of Geumgwang agricultural reservoir in 2015

Sites	Sta- tistics	Water temp.(°C)	pH	DO (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Chl- <i>a</i> (μg/L)	BGA (μg/L)
site1	Max.	28.70	9.50	13.48	12.20	2.99	0.05	46.00	46.50
	Min.	2.70	7.58	7.66	3.60	0.24	0.00	6.80	11.00
	mean	19.73	8.68	11.68	6.24	1.40	0.02	20.86	28.79
	S-D ¹	8.85	0.70	1.71	2.26	0.81	0.02	11.72	13.13
	Cv ²	0.45	0.08	0.15	0.36	0.58	0.73	0.56	0.46
site2	Max.	28.40	9.47	13.48	11.60	5.29	0.29	44.70	46.00
	Min.	2.50	7.45	7.50	3.80	0.04	0.00	6.60	13.00
	mean	19.67	8.68	11.63	6.57	1.59	0.06	20.81	29.07
	S-D	8.85	0.71	1.75	2.05	1.18	0.09	11.53	12.51
	Cv	0.45	0.08	0.15	0.31	0.74	1.38	0.55	0.43
site3	Max.	28.90	9.46	13.50	10.80	5.48	0.08	44.90	42.40
	Min.	2.60	7.42	7.22	3.40	0.09	0.00	5.40	13.20
	mean	19.61	8.67	11.55	6.31	1.62	0.03	21.26	26.97
	S-D	8.84	0.71	1.79	1.87	1.21	0.03	12.10	10.14
	Cv	0.45	0.08	0.15	0.30	0.75	0.87	0.57	0.38
site4	Max.	28.90	9.50	13.50	N/A ³	N/A	N/A	44.70	47.30
	Min.	2.70	7.45	7.50	N/A	N/A	N/A	8.10	11.40
	mean	19.69	8.72	11.67	N/A	N/A	N/A	22.98	29.61
	S-D	8.88	0.70	1.74	N/A	N/A	N/A	11.67	13.23
	Cv	0.45	0.08	0.15	N/A	N/A	N/A	0.51	0.45
site5	Max.	29.70	9.58	13.50	N/A	N/A	N/A	45.70	45.80
	Min.	2.70	7.45	7.56	N/A	N/A	N/A	7.20	11.20
	mean	19.76	8.68	11.77	N/A	N/A	N/A	23.25	28.77
	S-D	8.95	0.75	1.76	N/A	N/A	N/A	12.13	13.18
	Cv	0.45	0.09	0.15	N/A	N/A	N/A	0.52	0.46
Sites	Sta- tistics	Water temp.(°C)	pH	DO (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Chl- <i>a</i> (μg/L)	BGA (μg/L)
site6	Max.	30.00	9.59	13.50	N/A	N/A	N/A	43.80	44.00
	Min.	2.80	7.40	7.81	N/A	N/A	N/A	7.30	12.70
	mean	19.81	8.70	11.85	N/A	N/A	N/A	24.30	29.46
	S-D	8.95	0.72	1.71	N/A	N/A	N/A	11.83	12.60
	Cv	0.45	0.08	0.14	N/A	N/A	N/A	0.49	0.43
site7	Max.	28.60	9.50	13.60	10.00	2.95	0.09	45.30	42.30
	Min.	2.70	7.46	7.30	3.80	0.19	0.00	4.70	13.40
	mean	19.77	8.69	11.80	6.43	1.33	0.04	19.38	26.99
	S-D	8.88	0.68	1.95	1.93	0.70	0.03	11.97	10.93
	Cv	0.45	0.08	0.17	0.30	0.53	0.69	0.62	0.41
site8	Max.	30.50	9.58	13.44	10.00	2.28	0.08	45.40	43.00
	Min.	2.70	7.40	7.35	3.60	0.12	0.00	3.90	13.10
	mean	20.04	8.67	11.90	6.47	1.13	0.03	20.49	27.39
	S-D	9.15	0.71	1.81	1.90	0.69	0.02	11.96	11.74
	Cv	0.46	0.08	0.15	0.29	0.61	0.76	0.58	0.43
site9	Max.	30.30	9.52	13.40	N/A	N/A	N/A	34.90	44.00
	Min.	2.70	7.40	7.19	N/A	N/A	N/A	3.60	13.90
	mean	19.72	8.69	11.75	N/A	N/A	N/A	17.28	26.80
	S-D	8.99	0.73	1.95	N/A	N/A	N/A	9.61	12.67
	Cv	0.46	0.08	0.17	N/A	N/A	N/A	0.56	0.47
site10	Max.	30.00	9.52	13.60	9.80	2.96	0.11	34.80	43.50
	Min.	2.70	7.40	8.98	3.40	0.00	0.00	3.60	3.10
	mean	19.64	8.66	12.08	6.16	1.45	0.04	15.13	23.79
	S-D	8.99	0.72	1.44	1.86	0.93	0.03	9.16	13.51
	Cv	0.46	0.08	0.12	0.30	0.64	0.80	0.61	0.57

¹S · D: Standard deviation, ²Cv: Coefficient of variation, ³N/A: Not available **Fig. 4.** Box plots of various water quality parameters at each site of Geumgwang agricultural reservoir in 2015.

태를 나타냈다. DO의 평균은 11.8 ± 0.04 mg/L이며, 최대값과 최소값 모두 조사지점에서 유사한 수치를 나타냈다. COD의 평균은 6.4 ± 0.05 mg/L, TN의 평균은 1.4 ± 0.06 mg/L, TP의 평균은 0.04 ± 0.005 mg/L로 조사되었다. Chl-*a*의 평균은 20.6 ± 0.8 µg/L, BGA의 평균은 27.8 ± 0.5 µg/L로 조사지점간 유사한 수치를 나타냈다. 변동계수(Cv)를 비교한 결과, 수온, 영양염류(TN, TP), 조류농도(Chl-*a*, BGA) 값이 pH, DO, 유기물질(COD)보다 평균대비 상대적인 편차의 크기가 매우 큰 것으로 조사되었다. 이는 수온, 영양염류, 조류농도가 pH, DO, 유기물질 대비 계절적 변화가 상대적으로 큰 것으로 판단되며, 기존 연구에서도 유사한 연구결과가 보고되었다.^{21,22)}

금광 저수지의 조사지점(10지점)의 수질 측정 자료를 활용하여 자료 분포의 대칭성, 중심위치, 산포도 등을 파악하기 위하여 Boxplot을 작성하였다. 그래프의 하단부터 자료값의 5%, 25%, 75%, 95%, 흑선은 중앙값, 백선은 평균값으로 나타내었으며, 8항목(수온, pH, DO, COD, TN, TP, Chl-*a*, BGA) 모두 각 지점의 평균값은 유사한 것으로 나타났다. 또한, 각 지점의 범위가 서로 겹치는 것으로 보아 조사지점의 각 수질 측정값의 분포가 다르지 않다고 판단된다.

Table 3. Results of ANOVA analysis for various water quality parameters in terms of different sampling sites

	Parameters	Sum of squares	df	Mean square	F	Sig.
Water temp.	Between groups	1,948	9	0,216	0,003	1,000
	Within groups	11970,684	140	85,505		
	Total	11972,632	149			
pH	Between groups	0,034	9	0,004	0,007	1,000
	Within groups	76,171	140	0,544		
	Total	76,205	149			
DO	Between groups	1,840	9	0,204	0,059	1,000
	Within groups	293,353	84	3,492		
	Total	295,193	93			
COD	Between groups	1,778	5	0,356	0,085	0,994
	Within groups	353,493	84	4,208		
	Total	355,272	89			
TN	Between groups	2,403	5	0,481	0,502	0,774
	Within groups	80,430	84	0,957		
	Total	82,833	89			
TP	Between groups	0,014	5	0,003	1,413	0,228
	Within groups	0,162	84	0,002		
	Total	0,175	89			
Chl- <i>a</i>	Between groups	833,008	9	92,556	0,652	0,751
	Within groups	16046,892	113	142,008		
	Total	16879,901	122			
BGA	Between groups	197,341	9	21,927	0,122	0,999
	Within groups	10779,303	60	179,655		
	Total	10976,643	69			

3.3. 일원분산분석(ANOVA) 결과

일원분산분석(ANOVA) 결과, 8항목(수온, pH, DO, COD, TN, TP, Chl-*a*, BGA) 모두 *p*-value가 0.05 이상으로 나타났다. 이를 통해, 다양한 수질인자들의 조사지점별 측정값은 유의한 수준에서 서로 다르지 않다는 통계학적 결과가 도출되었다(Table 3 참조). 또한, 각 수질인자의 조사지점 간의 유의확률(*p*-value)이 0.228 이상으로 높게 평가된 것으로 판단해 총 10개 조사지점의 수질은 유의한 수준에서 서로 다르지 않다고 평가할 수 있으며, 이를 통해 차광구역과 비차광구역의 수질은 통계학적으로 유의한 수준에서 다르지 않다고 판단된다.

3.4. 차광구역과 비차광구역의 수질 비교

앞선 일원분산분석을 통해 차광구역과 비차광구역의 수질은 유의한 수준($\alpha = 0.05$)에서 다르지 않다고 분석되었으며, 이러한 결과를 토대로 차광구역 6지점과 비차광구역 4지점을 각각 그룹화하여 시간에 따른 다양한 수질의 수심별 변화를 Figs. 5~7에 나타내었다.

수온은 여름철 기온 상승과 함께 증가하였으며, 6월경부터 수심에 따른 수온차이가 발생하여 수온약층이 형성되었으나 차광구역과 비차광구역의 수온차이는 거의 발생하지 않은 것으로 보아 수상 회전식 태양광 발전시설의 설치로 인한 일사량 유입 저하는 수체의 수온 감소를 유발하지 않는 것으로 판단된다(Fig. 5(a)). 유사한 연구에서도 차광에 따른 수온감소는 없는 것으로 조사되었다.^{23,24)} pH도 차광구역과 비차광구역 사이의 유의할만한 차이가 발생하지 않았으며, 5월부터 수온의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이며 표층보다 수심 1 m에서 더 높은 수치를 나타내었다. 이는 여름철 조류농도가 표층대비 수심 1 m에서 더 높았던 것으로 판단하여 증가된 조류의 활발한 광합성 작용으로 인해 HCO₃⁻나 CO₃²⁻의 소모와 OH⁻의 방출로 수심 1 m에서 pH 값이 높아진 것으로 판단된다(Fig. 5(b)).²³⁾ DO도 차광에 의한 유의할 만한 차이는 없었으며, 5월부터 수심이 깊어짐에 따른 DO의 감소가 관찰되었다(Fig. 5(c)). 이는 5월 이후 농업용수 공급과 급격한 저수량의 감소로 인하여 수체의 혼합이 발생하여 퇴적층의 유기물질이 부유하면서 유기물질을 분해하는 미소동물과 미생물에 의한 용존산소 소모가 증가되어 발생한 현상으로 사료된다.²⁵⁾

COD의 농도는 6월부터 증가하는 추세를 나타내며, 8월 차광구역의 농도가 비차광구역 대비 일부 높은 값을 나타내었다(Fig. 6(a)). 이는 수상 회전식 태양광 발전시설 구조물 내부에 부착한 부착조류의 과다한 성장, 사멸 및 탈리를 통해 구조물 주변 수체의 COD 증가에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.^{26,27)} 영양염류인 TN과 TP의 경우에는 측정기간 동안 큰 변화를 나타내지 않았으나 일부 지점에서는 큰 편차를 나타냈다. 영양염류인 TN과 TP의 농도는 차광구역과 비차광구역의 유의할 차이는 나타나지 않은 것으로 조사되었다(Fig. 6(b), (c)).

● Light blocking zone, ○ Light penetration zone

Fig. 5. Annual variation in water temperature, pH and DO between light blocking zone and light penetration zone in Geumgwang reservoir (2015).

● Light blocking zone, ○ Light penetration zone

Fig. 6. Annual variation in COD, TN and TP between light blocking zone and light penetration zone in Geumgwang reservoir (2015).

Fig. 7. Annual variation in Chl-a and BGA between light blocking zone and light penetration zone in Geumgwang reservoir (2015).

연구기간 중 6월부터 수심 1 m에서 Chl-a와 BGA 농도가 최대치로 관측되었으며, 이러한 현상은 수온이 상승함에 따라 식물성 플랑크톤이 대사를 위해 수면으로 올라왔으나 일사량에 민감한 일부 남조류가 수직 이동하여 나타난 결과로 판단된다.^{28,29)} Chl-a 농도는 TP의 농도변화와 연동하여 유사하게 나타났으며, 이를 통해 조사대상 농업용 호수

는 Chl-a와 TP의 양의 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 7월 Chl-a와 BGA의 농도는 비차광구역 대비 차광구역에서 일부 구간에서 높은 값으로 조사되었는데(Fig. 7), 이는 수상 회전식 태양광 발전시설의 구조물에 의해 취송류의 흐름이 저해되어, 일부 구간 성층화 현상으로 조류성장에 적합한 환경을 제공하였기 때문으로 판단된다.³⁰⁾ 또한, 차광구역의

수심이 비차광구역보다 낮은 지형적 특성으로 여름철 수위 저하 시 차광구역의 일사량 유입증가로 인해 차광구역의 조류 성장이 상대적으로 촉진되었기 때문으로 판단된다.²⁶⁾ 비록 차광구역의 조류농도가 일부 구간 높게 나타났으나, 이러한 결과는 7월에 일시적으로 나타나는 현상으로 전체 수질에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 조사되었다. 따라서 수상 회전식 태양광 발전시설 설치에 따른 차광으로 인한 조류성장 억제효과는 미미한 수준으로 판단된다.

차광구역과 비차광구역간의 수온, pH, DO, COD, TN, TP, Chl-*a*, BGA의 수심별 차이는 유의수준에 서로 겹치는 것으로 보아 서로 다르지 않다고 판단된다. 따라서 차광구역과 비차광구역의 시간 및 수심에 따른 수질차이는 통계학적으로 다르지 않다고 조사되었다. 이는 수상 회전식 태양광 발전시설의 면적이 수체의 만수면적의 0.5% 미만으로 차광면적이 협소하였으며, 낮은 저수율로 차광구역과 비차광구역의 수체 순환이 비교적 원활하게 발생했기 때문으로 판단된다. 본 연구와 유사한 차광에 의한 수질변화 연구²³⁾에서도 차광시설 내·외부의 농도차가 통계학적으로 유의할만한 수준으로 나타나지 않았고, 전체 조사 수심에서 차광구역과 비차광구역의 조류농도가 유사한 것으로 나타나 차광구역과 비차광구역의 수체 순환이 이루어져 차광시설이 수체의 수질에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 보고하였다.

따라서, 금광저수지에 설치되어있는 수상 회전식 태양광 발전시설의 차광면적은 0.5% 미만으로 호소 수질에 미치는 영향은 실제적으로 미미한 것으로 판단되며, 수상 회전식 태양광 발전시설의 설치에 따른 수질변화를 보다 면밀히 연구하기 위해서는 대규모 수상 회전식 태양광 발전시설의 설치에 따른 차광면적의 증대(총수면적 대비 10% 이상)와 장기적(3년 이상) 수질 및 수생태계 관측이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

수상 태양광 발전시설은 댐이나 호소, 저수지의 잉여공간인 수면역에 설치하여 수위 변동에 대응하도록 하는 발전시설로 육상 태양광 발전시설 대비 발전효율이 높은 발전 시스템이지만 수상 태양광 발전시설의 설치로 인한 수체의 수질오염과 수생태계 교란을 야기할 수 있다는 우려가 지속적으로 제기되고 있다. 본 연구는 수상 태양광 발전시설의 설치로 인한 농업용 저수지의 수질변화를 알아보고자 경기도 안성시 금광저수지에 위치한 수상 회전식 태양광 발전시설에서 발전시설로 설치에 따른 차광구역 6지점과 비차광구역 4지점을 선정하여 1년 동안 총 16회에 걸쳐 차광으로 인한 수질변화를 시간과 수심 별로 분석하였다.

저수지의 수질변화를 조사한 결과, 수온, 영양염류(TN, TP), 조류농도(Chl-*a*, BGA) 값이 pH, DO, 유기물질(COD)보다 평균대비 상대적인 편차의 크기가 매우 큰 것으로 조사되었다. 그러나 일원분산분석(ANOVA) 결과, 8항목(수온,

pH, DO, COD, TN, TP, Chl-*a*, BGA) 모두 *p*-value가 0.05 이상으로 나타났으며 이를 통해 다양한 수질인자들의 조사 지점별 측정값은 유의한 수준에서 서로 다르지 않다는 통계학적 결과가 도출되었다. 이러한 결과를 토대로 측정지점을 차광구역(site 1~6)과 비차광구역(site 7~10)으로 그룹화 후 시간 및 수심에 따른 변화를 확인한 결과, 차광구역과 비차광구역 간의 수온, pH, DO, COD, TN, TP, Chl-*a*, BGA의 계절 및 수심에 따른 차이는 유의한 수준에서 통계학적으로 다르지 않았다(*p* > 0.05). Chl-*a*와 BGA의 경우, 7월에 비차광구역보다 차광구역에서 일부 높은 농도가 관측되었으나 이는 기록적인 가뭄과 낮은 저수량, 발전시설 구조물에 부착된 부착조류의 과다성장으로 인한 일시적 현상으로 전체 수질은 통계학적으로 유의할 만한 차이가 없는 것으로 조사되었다. 차광구역과 비차광구역 간의 다양한 수질인자의 계절 및 수심에 따른 차이가 관측되지 않은 이유는 수상 회전식 태양광 발전시설의 설치로 인한 저수지 수면의 차광이 전체 수면적 대비 0.5% 미만으로 일사량 유입 감소 효과는 취송 및 방류를 통한 저수지 수체의 혼합 효과 대비 미미했기 때문인 것으로 판단된다. 향후, 수상 회전식 태양광 발전시설의 설치에 따른 수질변화를 보다 면밀히 연구하기 위해서는 대규모 수상 회전식 태양광 발전시설의 설치에 따른 차광면적의 증대(총수면적 대비 10% 이상)와 장기적(3년 이상) 수질 및 수생태계 관측이 필요할 것으로 판단된다.

KSEE

References

- Omer, A. M., "Energy, environment and sustainable development," *Renew. and Sust. Energy Rev.*, **12**(9), 2265~2300(2007).
- Won, C. S., "Technical trend of floating PV system," *J. Korean Solar Energy Soc.*, **13**(1), 18~23(2015).
- Park, J., Seager, T. P. and Rao, P. S. C., "Lessons in risk-versus resilience-based design and management," *Integrated Environ. Assessment and Manage.*, **7**(3), 396~399(2011).
- Korea legislation research institute, "Study on Promotion Legislation for New & Renewable Energy against Energy Crisis,"(2011).
- Lee, S. H., Lee, N. H., Choi, H. C. and Kim, J. O., "Study on Analysis of Suitable Site for Development of Floating Photovoltaic System," *J. KIIEE*, **26**(7), 30~38(2012).
- Korea New and Renewable Energy Center, "2014 Renewable energy industry statistics,"(2015).
- Roh, T. H., "Photovoltaic Business of the present condition and policy considerations," *Environ. Forum*, **19**(6), 1~19(2015).
- Choi, B. S., Jang, T. H., Kim, Y. I., Yoo, J. H. and Jang, H. Y., "A study on the verification of the environmental safety in floating photovoltaic power system," in Proceedings of the annual meeting of Korean Society For New And Renewable Energy, KSNRE, Haeundae grand hotel, Busan, pp. 211~211(2015).

9. Choi, Y. K., "A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact," *Int. J. Software Eng. and Its Appl.*, **8**(1), 75~84(2014).
10. Korea National Environmental Technology Information Center, "Technical trend of floating PV system,"(2016).
11. Korea Rural Community Corporation, "Investigation of water pollution source in the waterside area in geumgwang reservoir,"(2008).
12. Solkiss, "Comparison analysis of Photovoltaic system,"(2015).
13. Won, S. J., "Water Quality Forecasting in Geumgwang Reservoir using WASP5 Model," Master dissertation, The graduate school of technology Hankyong National University, Korea(2008).
14. Agriculture water total information system (RAWRIS) Home Page, <https://rawris.ekr.or.kr>, Dec.(2015).
15. Ministry of Environment, "environmental standard for water quality,"(2016).
16. Lee, I. J., "Evaluation of the water quality changes in agricultural reservoir covered with floating photovoltaic solar-tracking systems," Master dissertation, The graduate school of Hanbat National University, Korea(2017).
17. Ministry of Environment, "Official test method enacted by Korean Ministry of Environment,"(2016).
18. Antonio, C., Manuel, F. and Ricardo, F., "An anova test for functional data," *Computational Statistics & Data Anal.*, **47**(1), 111~122(2004).
19. Kim, J. H., Lee, S. W. and Cha, S. M., "Environmental statistics and data analysis," Hannarae Publishing Co., Seoul, pp. 55~243(2016).
20. Korea Meteorological Administration, "2015 Annual climatological report,"(2016).
21. Kim, J. M., Park, J. D., Noh, H. R. and Han, M. S., "Changes of Seasonal and Vertical Water Quality in Soyang and Pal-dang River-reservoir System, Korea," *Korean J. Limnol.*, **35**(1), 10~20(2002).
22. Kim, H. S. and Hwang, S. J., "Seasonal Variation of Water Quality in a Shallow Eutrophic Reservoir," *Korean J. Limnol.*, **37**(2), 180~192(2004).
23. Lee, Y. W. and Lee, H. Y., "Effects of Light-Blocking on Water Quality and Phytoplankton Community in Lake Juam," *Korean J. Limnol.*, **36**(2), 150~160(2003).
24. Larry, L. L. and Shane, L. L., "Riparian Shade and Stream Temperature," *Rangelands*, **18**(4), 149~152(1996).
25. Kang, Y. M. and Song, H. G., "Effect of sediment organic in Pond Yeonjukji matter on the oxygen consumption," *J. Basic Sci.*, **10**, 74~79(1999).
26. Jeon, J. H., Yoon, C. G., Ham, J. H., Kim, H. I. and Hwang, S. J., "Effects of Physical Parameters on Water Quality in Agricultural Reservoirs," *Korean J. Limnol.*, **35**(1), 28~35(2002).
27. Kim, H. J., Yoon, K. S. and Lee, K. S., "Characteristics of the Water Quality of Wanggung Agricultural Reservoir," *J. KCID*, **10**(2), 24~35(2003).
28. Allan, K. and Thomas, D. B., "Effect of Temperature on Blue-Green Algae (Cyanobacteria) in Lake Mendota," *Appl. and Environ. Microbiol.*, **36**(4), 572~578(1978).
29. Park, J. W., Yu, S. H., Lee, J. E. and Seo, E. W., "Dynamics of Phytoplankton Community by the Water Depth in Andong Reservoir," *J. Life Sci.*, **18**(9), 1249~1256(2008).
30. Lee, J. W., Kim, H. J. and Cho, Y. S., "A Numerical Model for Wind-Induced Circulation in a Thermally Stratified Flow," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **43**(10), 911~920(2010).