RESEARCH ARTICLE

수위변화에 의한 수상태양광 발전시스템 발전량 영향

권태흔[1] · 김정용[2] · 김의경[3] · 홍성규[4†]

[1]동국대학교 대학원 신재생에너지공학과, 박사과정
[2]동국대학교 대학원 신재생에너지공학과, 석 · 박사통합과정
[3]인천대학교 전기공학과, 교수
[4]동국대학교 신재생에너지공학과, 교수

Effect on Power Generation of Floating Photovoltaic Power System Power by Water Level Change

Kwon Tae Heun[1] · Kim Jeong-yong[2] · Kim Eui-kyung[3] · Hong Sung-Kyu[4†]

[1]Ph.D. Student, Graduate School of Renewable Energy Engineering, Dongguk University
[2]Ph.D. Student, Graduate School of Renewable Energy Engineering, Dongguk University
[3]Professor, Department of Electrical Engineering, Incheon National University
[4]Professor, Graduate School of Renewable Energy Engineering, Dongguk University

[†]Corresponding author: hsk5457@dongguk.edu

Abstract

A floating photovoltaic power system is a power generation system that floats on the surface of water. Owing to its floating characteristics, the structure moves as the water level changes. In this study, we investigated whether the changes in water level affect the amount of power generated by the floating photovoltaic power system. We selected floating solar power plants that are currently in operation and analyzed the annual/monthly utilization rates. Our results confirmed that the utilization rate of the floating photovoltaic power system installed in areas with marked changes in water level is the lowest. In addition, correlation analysis of environmental factors that affect power generation such as solar radiation, temperature, humidity, wind speed, and water level confirmed that changes in water level resulted in decrease in power generation.

Keywords: 수상태양광(Floating PV, FPV), 발전량(Power Generation), 수위(Water Level)

OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.2, pp.13-21, April 2022
https://doi.org/10.7836/kses.2022.42.2.013

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 15 March 2022

Revised: 30 March 2022

Accepted: 31 March 2022

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

에너지 자원이 부족한 우리나라는 2020년 기준 에너지 수입 의존도가 무려 93%[1)]에 달한다. 이러한 높은 의존도는 에너지 안보에 취약한 구조라는 지적이 나오는 대목이다. 1차 에너지 소비가 많을수록 온실가스 배출도 늘어나며, 전 세계가 기후위기 대응에 나선 상황에 '에너지 다소비 국가'라는 오명에 따르는 책임도 더 클 수밖에 없다.

이러한 상황에 우리나라는 지난해 10월, 2030년 온실가스 감축 목표와 2050년 탄소중립 시나리오를 확정했다. 이 시나리오엔 2020년 기준 29%를 차지하는 원자력에너지 비중을 2050년까지 6.1%로 줄이고 같은 기간 동안 신재생에너지 비중을 6.6%에서 70.8%로 늘린다는 로드맵[2]이 포함되었다. 2021년 기준으로 현재까지 보급된 신재생에너지 중 태양광에너지가 90% 이상[3]을 차지하고 있다. 태양광에너지의 기술적 완성도나 국민 수용성 측면을 고려할 때 여타의 다른 재생에너지 원에 비해 앞으로의 성장성은 폭발적일 것으로 예상된다.

그러나, 국토교통부 지목별 면적 비중을 보면 태양광 보급 확대는 녹록치 않은 상황이다. '한국의 토지는 70%가 산(山)'이란 비유처럼 임야 비중이 매우 높다. 더욱이 임야는 원칙적으로 개발을 허용하지 않는 보전산지가 대부분이다. 국토면적에서 2, 3번째로 비중이 높은 논(畓. 11.1%)과 밭(田. 7.5%)[4]은 대부분이 농지라 태양광 부지로 사용하는데 한계가 있고, 농지전용에 따른 식량안보 위협 등 부작용의 우려도 적지 않다. 국토의 3.2%를 차지하는 대지 주택의 경우 그나마 75%가 아파트 등 밀도가 높은 건축물이어서 활용도가 높지는 않다.

이에 반해 국내의 댐이나 저수지 등의 수상면적은 넓은 편이며 이를 활용한다면 태양광 보급 활성화에 기여할 수 있을 것이다. 수상면적의 2%, 10%, 15%를 수상태양광으로 설치할 경우 각각 1.2 GW, 5.9 GW, 8.9 GW의 잠재 설치량[5]을 보유하고 있다. 이러한 이유로 토지나 건축물 옥상이 아닌 저수지, 댐, 호수, 방조제 등 유휴수면에 태양광발전 시설을 설치하는 수상태양광은 태양광 보급확대의 핵심수단이 될 수 있을 것이다.

수상태양광 발전시스템은 수면에 부유하는 발전시스템으로 몇 가지 장점이 있다. 여름철 외기온도에 비해 낮은 수온이 모듈 온도를 낮추는 냉각효과[6]와 수면에서 반사되는 빛으로 인하여 발전량이 증가[7]하게 된다. 또한, 환경적인 측면에서도 태양광 차단을 통해 수중의 녹조류발생을 억제[8]하고 어류의 산란 번식에 유리한 환경을 만들어 준다는 것이다.

하지만, 수면에 설치한다는 특수성으로 인해 단점도 있다. 수상태양광은 수면에 부유하기 위해 부력체를 설치해야 하며, 설치 위치를 일정하게 유지하기 위한 계류장치도 필요하고, 물 수위가 연중 변화함에 따라 태양광 모듈이 이동함에 따라 발전량에 영향을 미칠 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 수상태양광의 수위변화가 발전량에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 분석하고자 한다. 이를 위해 현재 상업운전 중인 수상태양광 발전소 중 (1) 수위변화가 없는 유수지에 설치된 수상태양광, (2) 수위변화가 작은 저수지에 설치된 수상태양광, (3) 수위변화가 큰 댐 지역에 설치된 수상태양광을 선정하여 연간/월간 이용률에 대한 사례분석을 실시하고, 통계분석 프로그램 「R」을 활용하여 수상태양광의 수위변화와 발전량사이의 상관계수를 평가하여 서로간의 관련성에 대하여 파악하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수상태양광 설치 현황

우리나라의 수상태양광은 2013년 처음 설치되기 시작하여 2022년 1월 현재 전국에 총90개소(183 MW)가 설치 운영되고 있다. 설치장소는 저수지와 유수지 그리고 댐 등에 설치되어 지고 있으며, 저수지가 76개소로 전

체의 84% 차지하고 있고, 댐은 6개소로 7%를 차지하고 있다. 설치용량기준으로는 저수지에 설치된 수상태양은 57%로 104.768 MW이고, 댐에 설치된 수상태양광은 26%로 47.167 MW이다. 수상태양광 설치현황은 Fig. 1, Table 1과 같다.

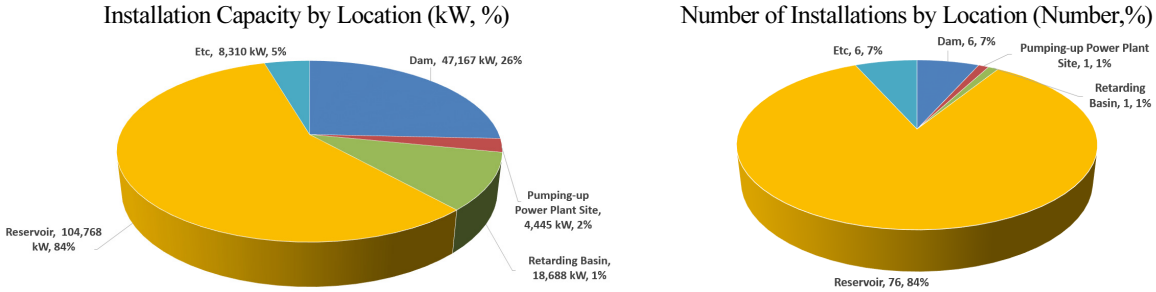


Fig. 1 Floating PV installation capacity and number by location (Author's summary)

Table 1 Floating PV Installation Status (Unit : kW, As of 2022.01, Author's summary)

Item	Dam	Pumping-up Power Plant Site	Retarding Basin	Reservoir	Etc	Total
	Number (Capacity)	Number (Capacity)	Number (Capacity)	Number (Capacity)	Number (Capacity)	Number (Capacity)
2013	2 (596.16)				1 (998.28)	3 (1,594.44)
2014	1 (99.2)			3 (874.8)		4 (974)
2015				6 (9672.88)		6 (9,672.88)
2016	1 (2,004.48)			3 (1957.44)	1 (1836)	5 (5,797.92)
2017				11 (10,462.04)	1 (1,171.8)	12 (11,633.84)
2018	1 (2,994.84)		1 (18,688.32)	20 (32,071.16)	3 (4,304.34)	25 (58,058.66)
2019				2 (954.72)		2 (954.72)
2020				7 (6,826.27)		7 (6,826.27)
2021	1 (41,472)	1 (4,444.65)		19 (39,162.18)		21 (85,078.83)
2022				5 (2,786.94)		5 (2,786.94)
Total	6 (47,166.68)	1 (4,444.65)	1 (18,688.32)	76 (104,768.43)	6 (8,310.42)	90 (183,378.5)

* A dam is a structure built across a river to block the flow of a river or to change the direction and slow it down. In this paper, it is used in a narrow sense to refer only to 'Large Dam'. (Large Dam standard : More than 15 m high, 10 - 15 m in height and more than 2000 m in length, or More than 3 million m^3 water storage capacity - source : http://www.kncold.or.kr/ds2_2.html)

2.2 수상태양광 발전시스템 수위변화 영향

수상태양광은 수면에 부유하는 발전시스템으로 수위 변동에 따라 수상 부유체가 상하로 움직일 수 있어야 하며, 바람이나 파랑 등에 의한 수상 부유체의 움직임이 최소화 되도록 고정(계류)하여야 한다. 우리나라의 대규모 댐은 대부분 다목적 댐으로 연중 수위차가 최고 40 ~ 50 m 달하는 곳도 있다. 다목적댐 중 수심 변동폭이 가장 큰 댐은

소양강댐으로 최대 수위변화폭이 48 m이며, 국내 댐에 설치되는 수상태양광은 48 m를 기준으로 설계하고 있다. Table 2는 소양강댐 최대 수위변화폭이다.

Table 2 Soyang River Dam Highest Water Level/Lowest Water Level[9)]

Item	Water Level	Note
Highest Water Level (H1, H.W.L)	198 EL.m	Plan Flood Level
Lowest Water Level (H2, L.W.L)	150 EL.m	-
Water Level Difference (H1 − H2)	48 m	Maximum Water Level Change

Fig. 2는 수위변화에 따른 모듈 이동을 도식화한 그림이다. 만(고)수위 때와 저수위 때에 부력체에 의해 수직분력이 다르게 나타나는데 저수위에서는 수직분력이 0에 가깝게 매우 작아짐에 따라 구조체의 회전 및 이동현상이 심하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 즉 수위에 따라 구조체의 회전 및 이동현상이 다르게 나타나며 이에 따라 발전출력에도 상당한 영향이 있을 것으로 예상된다.

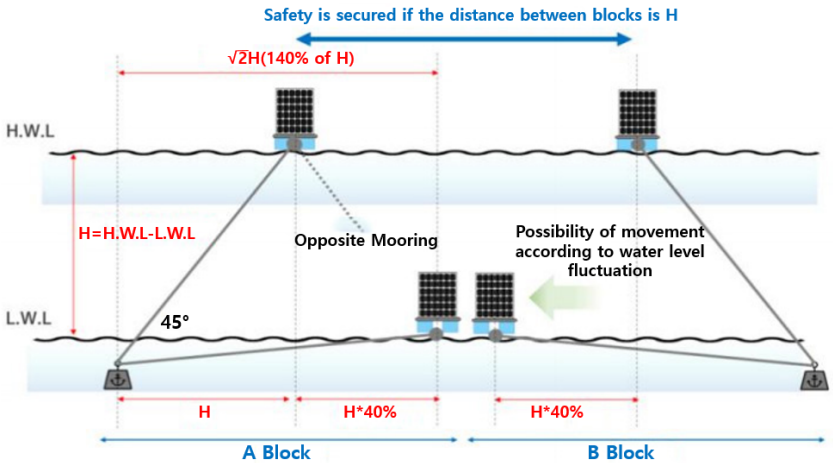


Fig. 2 Schematic diagram of module movement according to water level change[9)]

2.3 수상태양광 발전시스템 이용률 비교

수위변화에 의한 수상태양광 발전량 영향 분석을 위해 (1) 수위변화가 없는 유수지에 설치된 수상태양광 발전소, (2) 수위변화가 작은 저수지에 설치된 수상태양광 발전소, (3) 수위변화가 큰 댐에 설치된 수상태양광 발전소를 선정하여 연간/월간 이용률을 분석하였다. 태양광 모듈의 직·병렬 수, 인버터 용량 등 전체적인 태양광 설비구성은 고려해야할 변수가 너무 많아 고려하지 않았다. 분석대상지에 대한 개요는 Table 3과 같다.

Table 3 Floating PV utilization rate analysis site

Item	Installation Location	Installed Capacity	Module Capacity	Angle of Inclination	Year of Installation
Retarding Basin FPV	Gunsan 000 Retarding Basin surface of the water	18,688.32 kW	360 W	15°	2018
00 Reservoir FPV	Gunsan 00 Reservoir surface of the water	99 kW	330 W	15°	2017
00 Dam FPV	Jecheon 00 Dam surface of the water	2,994.84 kW	350 W	15°	2017

이용률은 태양광 발전설비가 24시간 동안 운영되었을 때의 발전량과 실제발전량의 비율이라 할 수 있다. 태양광 발전설비의 1일 가동비율로 볼 수 있으며, 분석대상지에 대한 이용률은 아래 식으로 계산하였다.

$$\text{이용률}(\%) = \frac{\text{실제발전량}(kWh)}{\text{설비용량}(kW) \times 24(\text{시간}) \times \text{운영일수}(\text{일})} \times 100$$

분석대상지에 대한 2019년 연간/월별 이용률은 Table 4와 같다.

Table 4 Comparison of monthly utilization rate of Floating PV

Item	Retarding Basin FPV (18,688.32 kW)		Reservoir FPV (99 kW)		Dam FPV (2,994.84 kW)	
	Monthly Power Generation (MWh)	Utilization Rate (%)	Monthly Power Generation (kWh)	Utilization Rate (%)	Monthly Power Generation (kWh)	Utilization Rate (%)
2019.01	1,682.94	12.10	8,640	11.73	302,229	13.56
2019.02	1,790.78	14.26	9,370	14.08	315,984	15.70
2019.03	2,536.67	18.24	12,820	17.41	356,414	16.00
2019.04	2,581.22	19.18	12,873	18.06	381,360	17.69
2019.05	3,248.93	23.37	16,824	22.84	475,970	21.36
2019.06	2,804.49	20.84	14,026	19.68	410,776	19.05
2019.07	2,397.24	17.24	11,817	16.04	299,102	13.42
2019.08	2,703.15	19.44	13,644	18.52	374,841	16.82
2019.09	1,918.04	14.25	9,897	13.88	296,400	13.75
2019.10	2,156.71	15.51	11,015	14.95	326,167	14.64
2019.11	1,652.61	12.28	8,417	11.81	263,505	12.22
2019.12	1,368.12	9.84	7,199	9.77	226,828	10.18
Total	26,840.90	**16.40**	136,542	**15.74**	4,029,576	**15.36**

연간 이용률을 분석한 결과, 수위변화가 없는 유수지 수상태양광의 연간 이용률(16.40%)이 가장 높은 것으로 확인되었으며, 저수지나 댐에 설치된 수상태양광 보다 연간 이용률이 0.66%p (16.40% – 15.74%), 1.04%p

(16.40% – 15.36%) 높게 나타났다. 그리고 수위변화가 큰 댐에 설치된 수상태양광이 수위변화가 상대적으로 작은 저수지 수상태양광 보다 낮은 이용률을 보이는 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 수상태양광이 설치된 00댐의 2019년 일평균 수위 그래프이다. 연간 수위변화 폭이 18.9 m이며, 최고 수위는 1월 6일경 139 EL/m, 최저 수위는 7월 14일경 121 EL/m으로 나타났다. 2월부터 7월까지는 완만하게 수위가 낮아지지만 장마 등의 사유로 수위가 올라가는 7월말부터 10월 중순까지는 2 ~ 7월 대비 기울기가 크다는 것을 확인할 수 있다. 홍수조절기능을 보유한 다목적 댐은 대부분 유사한 수위 패턴을 형성한다.

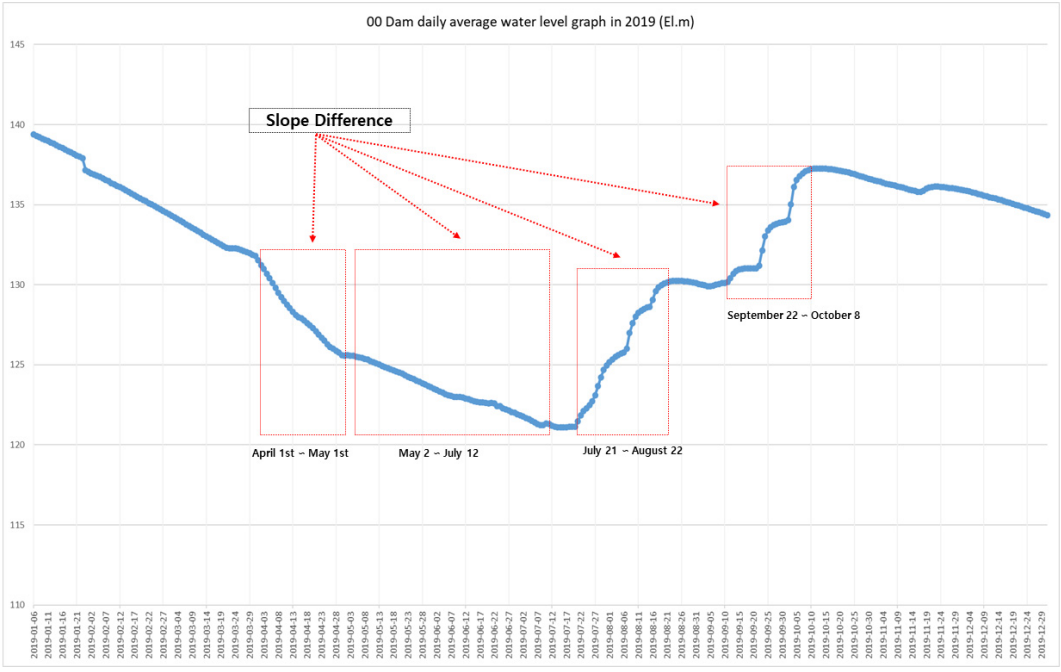


Fig. 3 00 Dam daily average water level graph in 2019

Table 5의 유수지, 저수지, 댐 수상태양광의 월별 이용를을 보면, 유수지, 저수지, 댐 수상태양광의 월별 이용률을 보면, 수위변화가 크지 않은 11월, 12월은 세 개 수상태양광의 월간 이용률 차이가 작다. 그리고, 수위변화가 발생하는 3월부터 10월까지 댐 수상태양광의 이용률이 가장 낮으며, 수위변화가 크게 발생하는 7월, 8월의 월간 이용률 차이가 다른 월에 비해 크다는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 “수위변화가 수상태양광 발전량에 영향을 미친다.”라고 추정 할 수 있다.

9월 말부터 10월 초까지도 수위변화가 크게 발생하였지만 분석대상지간의 월간 이용률 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 분석대상지의 9월, 10월 이용률이 7, 8월 이용률 대비 전체적으로 낮아졌으며, 이용률은 설비트러블 등 다양한 이유에 의해 낮아질 수 있기에 일단위 또는 분단위, 초단위 이용률을 확인해야 정확한 원인 파악이 가능할 것으로 판단된다.

Table 5 Difference in monthly utilization rate of Floating PV in the analysis site

Item	Retarding Basin FPV (18,688.32 kW)	Reservoir FPV (99 kW)	Dam FPV (2,994.84 kW)	Utilization Rate Difference (%p, A-B/A-C)
	Utilization Rate (%, A)	Utilization Rate (%, B)	Utilization Rate (%, C)	
2019.01	12.10	11.73	13.56	0.37 / -1.46
2019.02	14.26	14.08	15.70	0.18 / -1.44
2019.03	18.24	17.41	16.00	0.83 / 2.24
2019.04	19.18	18.06	17.69	1.12 / 1.49
2019.05	23.37	22.84	21.36	0.53 / 2.01
2019.06	20.84	19.68	19.05	1.16 / 1.79
2019.07	**17.24**	**16.04**	**13.42**	**1.20 / 3.82**
2019.08	**19.44**	**18.52**	**16.82**	**0.92 / 2.62**
2019.09	14.25	13.88	13.75	0.37 / 0.50
2019.10	15.51	14.95	14.64	0.56 / 0.87
2019.11	12.28	11.81	12.22	0.47 / 0.06
2019.12	9.84	9.77	10.18	0.07 / 0.34

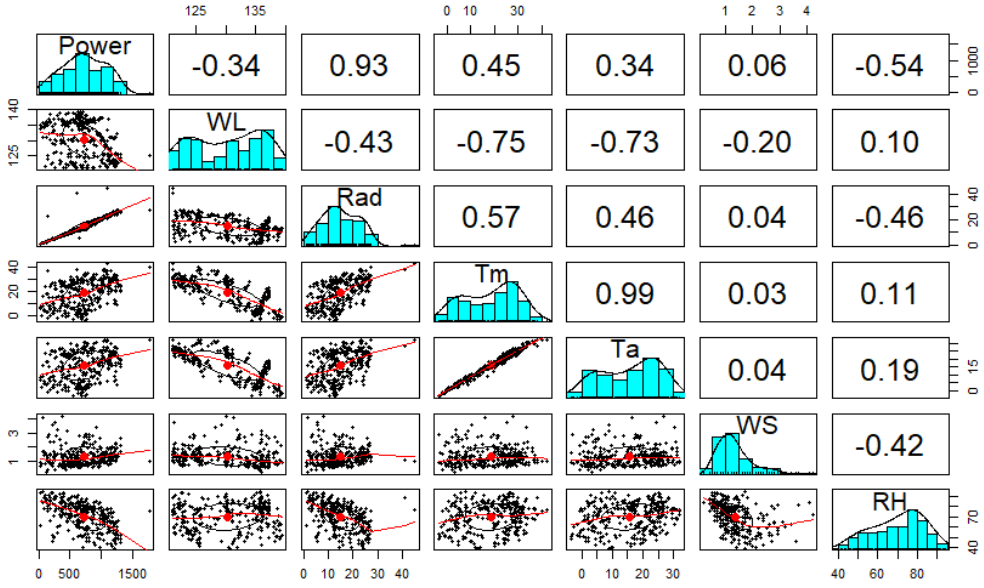
2.4 통계프로그램 『R』을 활용한 상관계수 도출

육상에 설치되는 태양광 발전시스템의 환경영향인자는 일반적으로 일사량과 외기온도, 바람, 습도 등이 있으나, 수면에 설치되는 수상태양광은 수면의 변화, 즉 수위변화에 영향을 받는다. 세 개 수상태양광 발전시스템의 월간/연간 이용률 분석 결과, 수위변화가 큰 댐에 설치한 수상태양광 이용률이 가장 낮다는 것을 앞 절에서 확인하였다. 따라서 수위변화와 발전량의 상관관계가 어느 정도인지를 파악하기 위해 통계프로그램 「R」을 사용하였다.

상관관계 확인을 위해 00댐에 설치된 수상태양광 발전시스템의 환경영향인자 데이터를 취득하였다. 2019년 일별 발전량, 일사량은 수상태양광 발전소 운영기관의 협조로 취득하였으며, 기상정보(외기온도, 풍속, 상대습도)는 기상정보공개 포털을 활용하였으며, 일별 수위는 환경부 홍수통제소에서 자료를 취득하였다.

Fig. 4와 Table 6는 통계프로그램 「R」을 활용한 00댐 수상태양광 환경변수와 태양광 출력을 나타내는 분산도와 상관계수 차트이다. 상관계수의 값(Value)이 높을수록 두 변수간의 연관성이 강해진다. 보통 0.3과 0.7 사이면 뚜렷한 양의 상관관계가 있으며, 0.7과 1.0 사이면 강한 양의 상관관계로 간주한다.

상관계수 값을 보면 발전량(Power)과 일사량(Rad)의 상관계수는 0.933으로 높은 양의 상관관계를 나타내고 있으며, 수위(WL)과 발전량(Power)은 −0.3357로 음의 상관관계를 나타내는 것으로 확인 할 수 있다. 일반적으로 상관관계의 방향은 계수의 부호로 표시되며, “+”부호는 양의 상관관계를 나타내고, “−”부호는 음의 상관관계로 역방향의 관계를 의미하는 것이다. 즉, 수위변화가 발전량 저하에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 또한, 외기온도(Ta)와 발전량(Power) 상관계수는 0.3396로 수위와 절대값에서 비슷한 상관관계를 가지는 것을 확인 할 수 있다.



* Power : Power Generation, WL : Water Level, Rad : Radiation, Tm : Module Temperature, Ta : Atmospheric Temperature, WS : Wind Speed, RH : Relative Humidity

Fig. 4 Dispersion and correlation coefficient : Between environmental variables and solar output

Table 6 Power generation & environmental factors Correlation Coefficient

Item	Power	WL	Rad	Tm	Ta	WS	RH
Power	1.00000000	-0.3357524	0.93308849	0.45018338	0.33967454	0.05545656	-0.53963618
WL	-0.33575235	1.00000000	-0.43277711	0.56889382	-0.72997131	-0.19579795	0.09766121
Rad	0.93308849	-0.4327771	1.00000000	0.56889382	0.45551981	0.04207442	-0.45966318
Tm	0.45018338	-0.7503186	0.56889382	1.00000000	0.98883295	0.03287542	0.11178223
Ta	0.33967454	-0.7299713	0.45551981	0.98883295	1.00000000	0.04398324	0.19191344
WS	0.05545656	-0.1957979	0.04207442	0.03287542	0.04398324	1.00000000	-0.42140199

3. 결 론

수면에 부유하는 수상태양광은 환경 특성상 수위가 변화함에 따라 구조체가 이동하게 된다. 특히, 댐은 연간 수위변화 폭이 40 m ~ 50 m로 달하며, 이러한 수위변화가 수상태양광 발전량에 영향을 미치는 것으로 예상은 하고 있었으나 구체적인 연구사례는 없었다. 이에 본 연구에서는 수상태양광 발전소의 현장 데이터를 수집하고, 『R』프로그램을 이용하여 수위변화와 발전량간의 상관계수를 평가하였다.

수위변화에 의한 영향을 분석하기 위해 (1) 수위변화가 없는 유수지 수상태양광, (2) 수위변화가 적은 저수지 수상태양광, (3) 수위변화 폭이 큰 댐 수상태양광을 분석대상지로 선정하여 연간/월별 이용률을 분석하여 보았다.

연간 이용률을 분석한 결과, 수위변화가 없는 유수지에 설치된 수상태양광의 경우 연간 이용률은 16.40%로 비교대상 중 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 저수지에 설치된 수상태양광 연간 이용률이 15.74%이며, 수위

변화가 큰 댐에 설치된 수상태양광 연간 이용률은 15.36%로 가장 낮은 것을 확인할 수 있었다.

또한, 수상태양광 발전시스템에 영향을 미치는 환경영향인자인 일사량, 외기온도, 바람, 상대습도, 수위와 발전량의 상관관계도 분석하였다. 상관계수 값을 보면 발전량(Power)과 일사량(Rad)의 상관계수는 0.9330으로 높은 양의 상관관계가 나타났으며, 수위(WL)와 발전량(Power)의 상관계수는 −0.3357로 음의 상관관계를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 외기온도(Ta)와 발전량(Power)의 상관계수는 0.3396으로 수위와 절대값에서 비슷한 양의 상관관계를 가지는 것을 확인 할 수 있다

수상태양광 발전시스템의 연간/월간 이용률과 발전량 환경영향인자에 대한 상관계수를 분석한 결과, 수위변화가 발전량 저하에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

태양광발전사업을 신규로 추진시, 입지발굴에서부터 시작하여 경제성분석 단계를 거치게 되며, 경제성 분석의 핵심은 연간 발전량 예측이라 할 수 있다. 지금까지 연구되어진 연간 발전량 예측은 일사량, 온도, 습도, 풍속 4대 환경영향인자만을 고려하여 왔다. 그러나, 수상태양광의 경우에는 수위의 변화가 발전량 저하에 영향을 미치고 있으므로 수위인자를 반영한 신규 발전량 예측 모델개발이 필요할 것으로 판단되며, 이를 위하여 다양한 사례연구 등을 통한 추가적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Rim, C. T., 2021 Yearbook of Energy Statistics, Korea Energy Economics Institute, p. 10, 2021.
2. Joint Ministries, 2050 Carbon Neutral Scenario (Draft), 2021.
3. MOTIE, Installed 4.8GW of Renewable energy in 2021, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2022.
4. MOLIT, Cadastral Statistical Annual Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021.
5. Kang, G., A Study on the Establishment of Optimal Development Scenario of Renewable Generation in Korea, KEPCO Research Institute, p. 52, 2017.
6. Kwon, O., Kwon, J., Jo, H., and Cha, H., The Deduction of Generation Efficiency Coefficient of the Floating PV Systems with the Cooling Effect of Water Surface, The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 69, No. 9, pp. 1364-1370, 2020. https://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.9.1364.
7. Kwon, O., Jo, H., Cho, Y., Kwon, J., and Kim, S., Hanju Cha. Experimental Verification of the Efficiency Increase of Floating PV with Water Surface Reflection, KIEE Summer Conference, pp. 1222-1223, July 2019, Goseong-gun, Republic of Korea.
8. Roh, T., Floating PV Environmental Monitoring and Environmental Safety Verification, Korea Environment Institute, p. 43, 2014.
9. Han, S., A Study on Systematic Management of Dam Water Surface and Establishment of Rational Utilization Plan, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2019.