RESEARCH ARTICLE

수상태양광 양면형 모듈 적용을 통한 수면반사 효과 분석

이지은[1†] · 조현식[2] · 임지연[3] · 김현준[3]

[1]K-water 연구원, 선임연구원
[2]K-water 연구원, 책임연구원
[3]K-water 연구원, 차장

Analysis the Effect of Water Reflection with Bifacial Module in Floating PV

Lee Jieun[1†] · Jo Hyunsik[2] · Im Jiyeon[3] · Kim Hyun Jun[3]

[1]Senior Researcher, K-water Research
[2]Principal Researcher, K-water Research
[3]Senior Manager, K-water Research

[†]Corresponding author: jelee@kwater.or.kr

Abstract

Renewable energy is major agenda to reduce the Carbon Emissions the world. Photovoltaic energy has high potential to achieve the goal. One of issue in Photovoltaic is increase the power density, in which, bifacial module is took account. Bifacial modules have the optical advantage of greater light collection compared to mono-facial modules. Therefore, bifacial photovoltaic technology has been receiving increasing interest because it promises a higher performance yield and lower levelized cost of energy than mono-facial photovoltaic (PV) technology. Herein, the effect of the bifacial module was compared with that of the monofacial module of a floating photovoltaic located in the valley of a reservoir near a Dam in South Korea. The system consisted of a mono-facial module, bifacial modules, a micro-inverter for checking the power of each module, and insolation for measuring the irradiation and reflection of water. Consequently, the bifacial gain with power generation of the bifacial PV was 4% ~ 5% and the performance ratio was 3.8% ~ 4%. The bifacial gain with only water reflection was maximum 2.74%.

Keywords: 수상태양광(Floating PV), 재생에너지(Renewable energy), 양면형 모듈(Bifacial module), 수면반사(Water albedo)

기호 및 약어 설명

LCOE : Levelize Cost of Energy

FPV : Floating Photovoltaic

PR : Performance ratio

OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.44, No.1, pp.21-28, February 2024
https://doi.org/10.7836/kses.2024.44.1.021

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 14 December 2023

Revised: 18 December 2023

Accepted: 18 December 2023

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

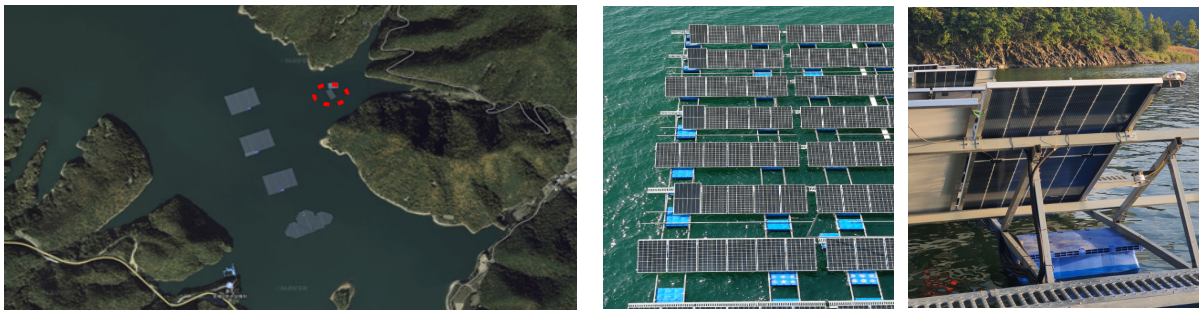
대한민국 정부의 120대 국정과제 중 에너지안보 확립 및 에너지 신사업 신시장 창출에 따르면 태양광, 풍력 등 신·재생에너지산업을 고도화 목표로 사업을 추진 중이다. 특히 우리나라 재생에너지 중 태양광은 70%[1)]비중을 차지하여 신재생에너지 중 태양광을 이용한 탄소중립이 이행하기 유리하나, 우리나라의 지형 특성상 지속적인 태양광발전시설 증가에 한계가 존재한다. 육상태양광의 한계점 극복을 위해 바다로 둘러싸여 있고 유휴수면을 다량 보유하고 있는 국내 지형 특성을 고려한 수상태양광을 적극적 활용이 필요하고 최적의 면적에 발전율을 향상시킬 수 있는 연구가 필요할 것으로 보인다. 발전효율증가를 위한 연구 중 하나인 양면형 모듈 개발 및 적용이 활발히 진행되고 있다.

양면형 모듈은 후면의 반사율에 따라 발전량 증가비율이 달라진다. 육상에 양면형 모듈 적용 시 후면반사에 따라서 발전량이 12.5%. 14.5% 증가한다고 보고되고 있다[2,3)]. 수상에서도 마찬가지로 후면반사의 주요요소인 수면 반사와 반사체의 반사에 따라 양면형 모듈의 발전량이 달라질 것으로 판단된다. 그 중 수면반사는 태양의 고도의 변화에 따라 반사율이 변경 된다고 알려져 있다. 태양의 고도가 높을 때 보다 고도가 낮을 때 수면에 반사되는 빛의 양이 많아지고, 하루 중 이른 오전과 늦은 오후에 반사율이 15%에서 20%까지 가장 높게 나타나며, 계절별로는 여름보다 겨울의 경우 10시 ~ 15시 사이에 약 2%에서 5%까지 증가한다고 보고하고 있다[4)]. 그러나 수면반사율은 육상 양면형 모듈에 적용되는 반사체의 반사도(20% ~ 60%)에 비해 현저히 낮은 값이다. Ziar et al.[5)]은 수상환경의 양면형 모듈이 단면형 모듈과 비교하였을 때 양면형 모듈이 단면형 대비 많은 장점을 갖고 있지만, 6.5%의 수면반사율을 갖고 있는 수상환경에 양면형 모듈 적용 시 양면형 효과가 미미하므로 후면 반사체 이용이 필요하다고 보고하고 있다. 반면에 Tina et al.[6)]은 시뮬레이션을 통해 수상에서 구조물의 높이 및 모듈간의 간격을 조절하여 수면의 반사를 20%까지 최대한으로 했을 때 최고 12.5%의 양면형 효과를 가질 수 있다고 발표하고 있다. 본 논문에서는 충주 청풍호 저수지(북위36.92도)에 양면형 모듈과 단면형 모듈 활용한 실증시스템을 설치하여 수상환경에 설치된 양면형 모듈의 효과를 검증하고 수면 반사 효과를 분석하고자 한다.

2. 실증시스템 위치 및 구성

Fig. 1(a), (b)는 양면형 모듈 성능 향상 확인을 위해 설치된 실증지 및 모듈 배치도를 나타낸다. 실증지는 36.92°N, 128.06°W 위치한 청풍호 저수지로 실증시스템은 연구용 100 kW 수상태양광 시스템에 설치되었다. Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 연구용 모듈의 총 18개의 스트링 중 4개 스트링을 이용하여 양면형 및 단면형 모듈을 교체하여 테스트를 진행하였다. 설치된 실증시스템은 기존 연구시설에서 설치된 방위각은 남쪽을 기준으로 동쪽으로 20도로 이동한 방향과 동일한 방향으로 설치되었으며, 구조체는 기존 단면형 모듈용으로 후면지지대를 포함하였고 경사각은 30도, 수면으로부터의 높이는 1.15 m로 설계된 구조체를 이용하여 양면형 테스트를 진행하였다. 구성은 Table 1에서 나타낸 것과 같이 대조군 모듈인 단면형 모듈 1매와 동일 출력으로 실험군 양

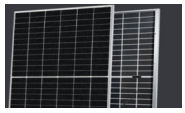
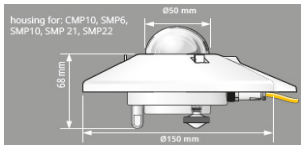
면형 모듈 3매를 서로 빛 간섭 없는 간격하에 모듈을 설치하였고, 각각 모듈의 출력을 확인하기 위해서 마이크로 인버터 4대, 일사량, 온도 센서를 설치하여 수면 반사율과 모듈 및 외기 온도를 확인하였다.



(a) (b)

Fig. 1 Floating PV location (a) and Test layout (b) for test Floating bifacial PV

Table 1 Test component for verifying floating bifacial PV

Item	Reference	Test
Module type	Monofacial	 Bifacial
Quantities	1 pcs	3 pcs
Power	445 W	
Inverter	4pcs (500W * 4)	
Etc.	 irradiance sensor	Temperature sensor

3. 결과 및 고찰

3.1 수면 반사율 분석

Fig. 2는 2023년 2월부터 2023년 10월까지의 전면일사량(a), 후면일사량(b) 그리고 반사율(c)을 나타낸 것이다. 2월에서부터 9월까지 전면일사량이 229.8 W/m^{2}에서 418.3 W/m^{2}로 증가하다가 10월에 369.4 W/m^{2}로 일사량 감소하는 경향이 보이고, 또한 후면일사량도 2월 ~ 7월까지 증가하는 경향을 보이다 7월 ~ 10월까지 소폭 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 후면일사량에 전면일사량의 비로 나타내어지는 반사율에는 큰 영향이 없는 것을 확인할 수 있다. 일출·일몰시간에는 월별로 일부 차이가 있으나 10시 ~ 15시 일사량이 높은 시간대의 반사율 평균은 4.0 ~ 5.2%로 계절에 상관없이 비슷한 결과를 보였다(Table 2). 전면일사량 및 후면일사량의

변화가 오전과 오후에 차이가 있는 것을 볼 수 있는 데, 이러한 원인은 Fig. 1(a)에서 보는 것과 같이 설치된 수상태양광 시스템의 방위각과 테스트 실증시설 설치 위치 특성에 의한 것으로 판단된다. 특히 전면일사량의 변화는 수상태양광 시스템 방위각 영향으로 일출 동안에는 동쪽 산에 의해서 일부 일사량 감소가 있었지만, 남동쪽을 향한 수상태양광 방위에 의해서 오후 대비 오전의 일사량이 더 높은 것으로 보인다. 반면에 후면일사량은 방위각과 지형적인 영향에 의해서 서쪽 산 대비 수상태양광 시스템 근처에 위치한 동쪽 산에 의해서 수면에서 반사될 수 있는 면적이 작아져 오전의 후면일사량이 오후에 비해 낮은 것으로 판단된다.

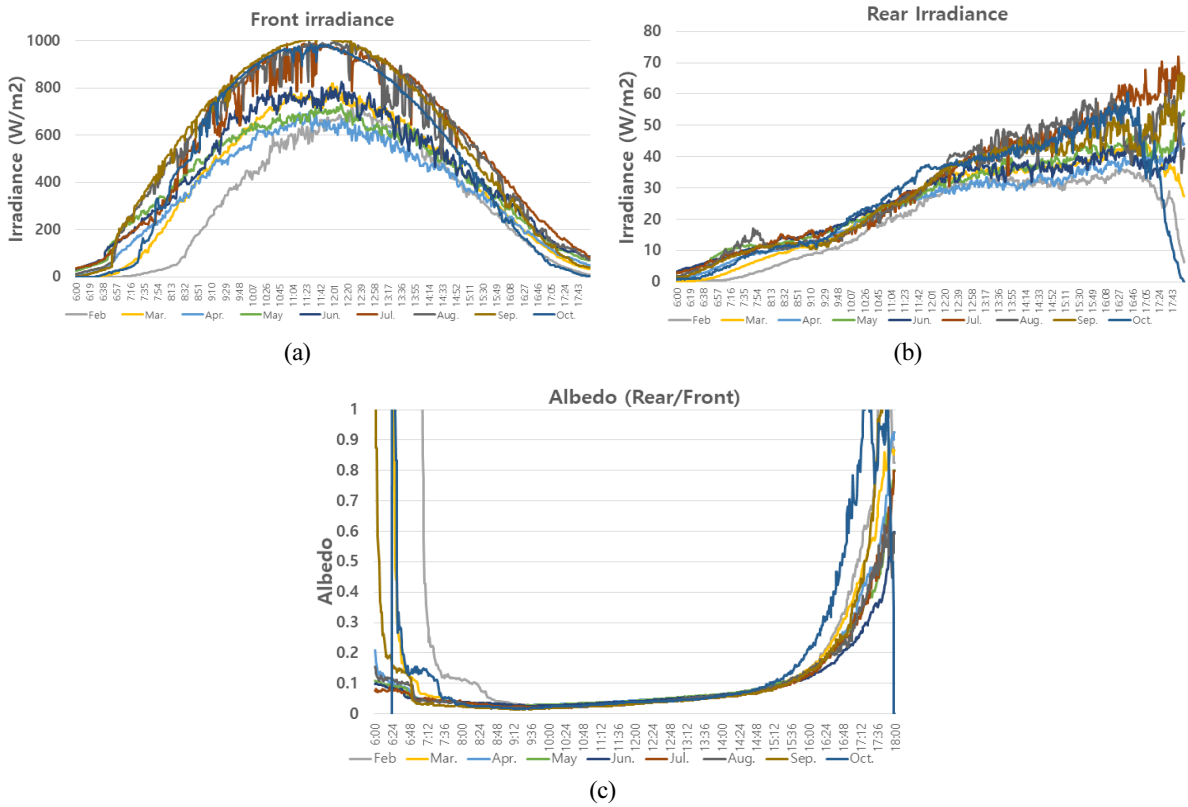


Fig. 2 Front Irradiance (a), Rear irradiance (b) and Albedo of water of Chungpung reservoir in Chungju

Table 2 The value of Front irradiance, rear irradiance and Albedo (10:00 ~ 15:00) according to with month

Itime	February	March	April	May	June	July	August	September	October
Front irradiance (Wh/m^2)	229.8	296.6	272.5	311.0	331.6	411.2	411.5	418.3	369.4
Rear irradiance (Wh/m^2)	14.7	18.3	18.5	22.5	22.8	30.8	25.3	22.9	20.7
Avg. Albedo (10:00 ~ 15:00)	4.6%	4.7%	5.0%	5.0%	4.8%	4.1%	4.3%	4.0%	4.4%

3.2 발전량 분석

이러한 일사량 및 반사율의 결과에 따라서 수상환경에서의 양면형 모듈의 발전량 변화를 알아보기 위해 월별로 단면형 모듈 및 양면형 모듈의 출력을 비교하여 효과를 확인하였다. Fig. 3(a)는 단면형 모듈 및 양면형 모듈의 하루 출력 변화를 나타낸 것으로 대표적으로 10월의 출력 변화를 나타내었다. 하루동안 단면형 및 양면형의 출력 변화를 보았을 때 10시 ~ 15시 사이에 양면형 모듈이 단면형 모듈 대비 출력이 높은 것을 확인할 수 있었고, 2월 ~ 9월도 비슷한 경향을 보였다. Fig. 3(b)은 단면형 모듈 및 양면형 모듈의 하루 평균 발전량과 양면형 효과를 월별로 비교한 것이다. 발전량 2월 ~ 5월까지는 발전량이 단면형 모듈기준 130 kWh에서 160 kWh로 증가하는 경향을 보이다가 6월부터 감소하여 140 kWh 대의 일정한 발전량을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 모듈 온도에 의해서 발생한 것으로 판단되는데 모듈의 온도가 외기 온도에 따라서 단면형·양면형 모듈 모두 증가하는 결과를 보인다. 6월 이후부터 모듈의 온도가 상승하면서 발전량이 감소하는 것으로 판단된다. 발전량을 이용한 양면형 효과를 비교하였을 때 6월을 제외하면 계절에 관계없이 4.1% ~ 5.0%로 비슷한 양면형 효과를 보인다. 이는 Fig. 2에서 확인한 바와 같이 일사량이 최대일 때 2월에서 10월동안 일정한 수면반사율로 인하여 발생한 것으로 판단된다.

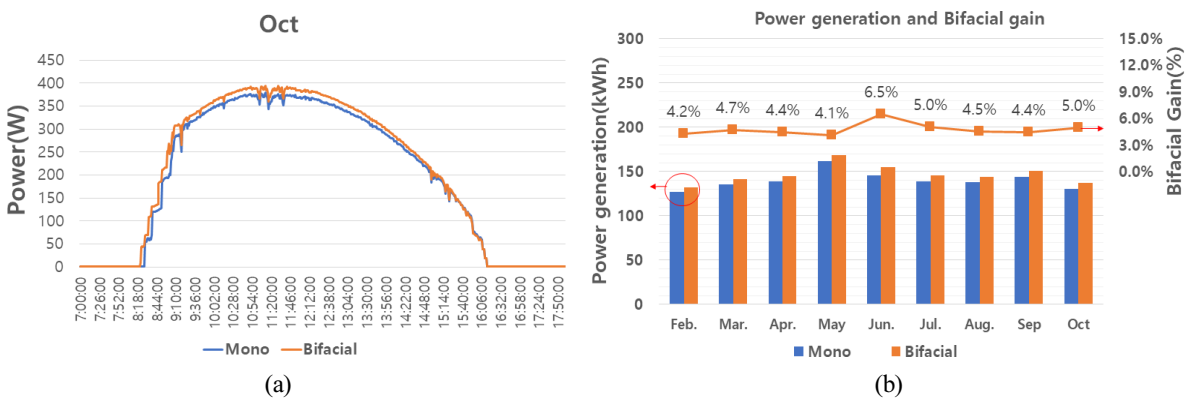


Fig. 3 Power variation during a day (a) and power generation and bifacial gain (b) of monofacial and bifacial PV

3.3 성능비 분석

모듈의 성능비(Performance ratio_PR)을 이용하여 일사량에 따른 단면형 및 양면형 모듈의 성능 분석하였다. 아래 식(1)은 성능비를 나타낸 것이다. 전면일사량을 이용하여 모듈의 발전량과 실제 발전량을 비교하여 단면형 및 양면형 모듈의 성능 차이를 확인할 수 있었다.

$$PR = \frac{Actual\ Power\ (kWh)}{(Irradiance\ (kWh/m2)\ on\ the\ panel \times Active\ area\ of\ PV\ \mathrm{module}\ (m2) \times PV\ \mathrm{module}\ Eff} \quad (1)$$

Fig. 4와 Table 3은 월별 수상 단면형, 양면형 모듈의 성능비 및 성능비에 따른 양면형 효과를 나타낸 결과이다. 2월에서 5월까지의 단면형 모듈 성능비는 평균 79.5% ~ 81.5%로 범위를 유지하다가 6월에 평균 63.9%로 감소하여 10월까지 평균 63.9 ~ 68.5%의 범위의 변화를 확인할 수 있었다. 반면에 양면형 모듈 성능비는 67.6 ~ 85.3%로 단면형 모듈대비 3.8 ~ 4.0% 높은 결과를 보였고, 이는 종합적으로 6월을 제외하면 수상환경에서 후면반사효과를 포함한 양면형 모듈이 단면형 모듈대비 3.0 ~ 4.0%의 효과를 보이는 것을 알 수 있다. 6월의 13.8% 양면형 성능비 결과는 단면형 모듈에 음영발생으로 출력이 저하된 것으로 판단되고 이에 과대 효과가 발생 된 것으로 보여 기존 성능비 경향에 포함하지 않았다.

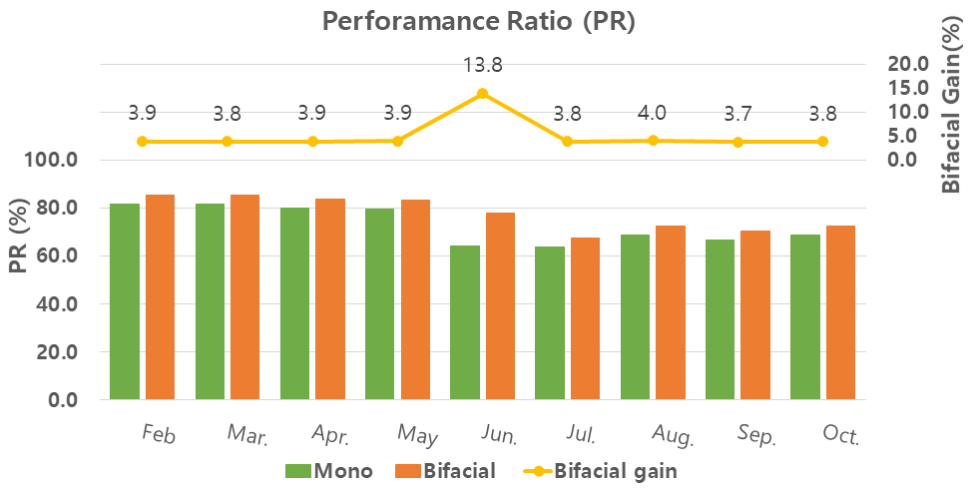


Fig. 4 Performance ratio of monofacial and bifacial module and bifacial gain depending on the month

Table 3 Performance ratio of monofacial and bifacial module and bifacial gain according to with month

Item	February	March	April	May	June	July	August	September	October
Monofacial PR	81.5	81.4	79.8	79.5	63.9	63.8	68.6	66.5	68.5
Bifacial PR	85.3	85.2	83.7	83.4	77.8	67.6	72.6	70.2	72.3
Bifacial gain	3.9	3.8	3.9	3.9	13.8	3.8	4.0	3.7	3.8

3.4 양면형 효과 분석

Fig. 5는 양면형 모듈에서 양면형 효과에 영향을 주는 요소를 나타낸 모식도이다. 양면형 효과의 주요영향인자로 내부반사와 수면반사 두 가지로 구성될 수 있다. 양면형 모듈의 수면 반사 효과를 확인하기 위해서 시간에 따른 양면형 및 단면형 모듈 출력을 이용하여 내부반사효과와 수면반사 효과를 구분하였다. 내부반사의 효과는 하루 중 단면형 모듈의 출력이 가장 높은 시간에 내부 반사효과가 극대화된다는 가정하에 단면형 모듈 및 양면형 모듈의 출력을 정규화하여 내부반사의 효과와 수면 반사에 의한 효과를 구분하였다.

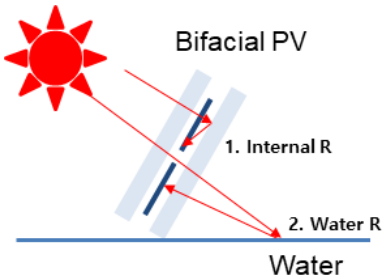


Fig. 5 Schematic of bifacial gain that internal reflection and water reflection

최종적인 양면형 효과로 볼 수 있는 내부반사 및 수면반사를 포함하는 경우를 Case 1이라고 정의하였고, 수면반사만 나타낸 경우를 Case 2라고 정의하였다. Fig. 6은 대표적으로 10월의 Case 1과 Case 2의 양면형 효과를 나타낸 것으로, 하루 중 10시 ~ 15시 사이에 Case 1과 Case 2의 양면형 효과가 발생하였다. 그래프를 보았을 때 Case1과 Case 2의 효과는 약 5% 정도 차이나는 것을 확인 할수 있다. 이를 좀 더 명확히 알아보기 위해 Table 4에서와 같이 Case 1과 Case 2의 효과를 월별로 나타내었다. 단면형 모듈의 음영 발생으로 인하여 양면형 과대 효과가 나타난 6월을 제외하면 Case 1에서는 2 ~ 7% 범위의 양면형 효과가 발생하였고, Case 2에서는 양면형 효과가 최고 2.74% (7월) 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 양면형 모듈에서 양면형 효과의 2 ~ 7% 범위 중 수면효과는 최고 2.74% 발생하는 것을 알 수 있다.

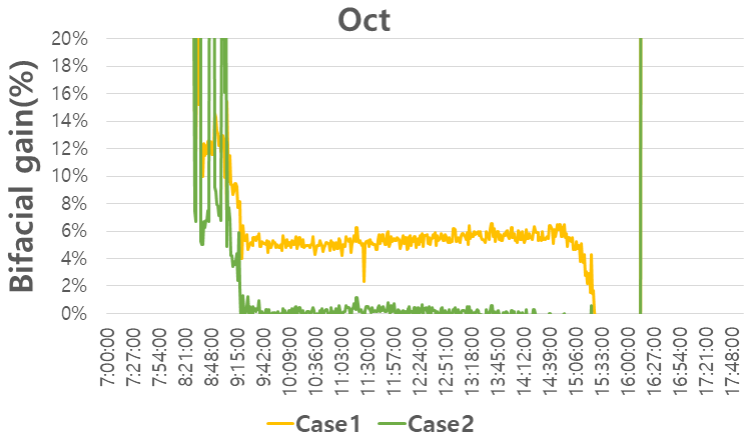


Fig. 6 Consisting of internal reflection and water reflection depending on the time of day

Table 4 The value of bifacial gain of total (internal R + water R) and water reflection only from Feb. to Oct.

Bifacial gain	February	March	April	May	June	July	August	September	October
Case 1 (Internal R + Water R)	3.72 ~ 6.24	4.10 ~ 5.90	2.75 ~ 6.23	3.53 ~ 6.55	4.34 ~ 9.56	2.09 ~ 6.81	1.86 ~ 7.51	4.25 ~ 6.43	2.34 ~ 6.56
Case 2 (Water R)	~1.39	~1.05	1.39	~2.51	~3.79	~2.74	~2.57	~1.95	~1.19

4. 결 론

수상태양광의 발전밀도를 향상하여 발전량 및 발전수익 증대를 위한 기술개발이 필요한 시점에서 본 논문에서는 양면형 모듈과 단면형 모듈을 활용한 실증시스템을 설치하여 수상환경에 설치된 양면형 모듈의 효과를 검증하고 수면 반사 효과를 분석하였다. 수면반사율은 모듈 출력이 높은 시간대인 10시 ~ 15시에 수면 반사율이 평균 4.2 ~ 5.2%로 계절에 상관없이 비슷한 값을 보인다. 이러한 수상환경에서 양면형 모듈은 단면형 모듈 대비 발전량은 평균 4.1% ~ 5.0% 향상되었으며, 성능비는 평균 3.8 ~ 4.0%로 향상되었다. 이와 같은 양면형 효과는 내부반사와 수면반사 두 가지 요소로 표현될 수 있고, 수면반사는 최고 2.74% 효과를 나타낸 것으로 분석하였다. 향후 수상환경에서의 양면형 모듈의 이러한 수면반사효과를 극대화하기 위해서는 별도의 반사체나 부력체 및 구조체의 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Kong, J., and Cho, H., Analysis of International New and Renewable Energy Policy and Market, Korea Energy Economics Institute Report, 2021-2027.
2. Seo, Y., Park, H., Yoo, Y., Kim, M., Oh, S. Y., Alhammadi, S., Chang, S., Park, S. H., Lee, J., Mun, S., Ahn, M., Dittmann, S., and Kim, W. K., Effect of Front Irradiance and Albedo on Bifacial Gain in 1.8kW Bifacial Silicon Photovoltaic System, IEEE 46th Photovoltatic Specialists Conference, June 2019, Chicago, IL, USA, https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8980585.
3. Park, D., Kim, M., So, W., Oh, S. Y., Park, H., Jang, S., Park, S. H., and Kim, W. K., Evaluation of Bifacial Si Solar Module with Different Albedo Conditions, Current Photovoltaic Research, Vol. 6, No. 2, pp. 62-47, 2018, https://doi.org/10.21218/CPR.2018.6.2.062.
4. Patel, S. and Rix, A., Water Surface Albedo Modeling For Floating PV Plants, Southern Africal Sustainable Energy Conference, November 2019, East London, South Africa.
5. Ziar, H., Prudon, B., Lin, F. Y., Roeffen, B., Heijkoop, D., Stark, T., Teurlincx, S., Senerpont Domis, L., Goma, E. G., Exterbarria, J. G., Alavez, I. N., Tiborg, D., Laar, H., Santbergen, R., and Isabella, O., Innovation Floating Bifacial Photovoltaic Solutions for Inland Water Areas, Progress in Photovoltaics, Vol. 29, pp. 725-743, 2021, https://doi.org/10.1002/pip.3367.
6. Tina, G. M., Scavo, F. B., Merlo, L., and Bizzarri, F., Comparative Analysis of Monofacial and Bifacial Module for Floating Power Plants, Applied Energy, Vol. 281, 116084, 2021, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116084.