

수상태양광발전시스템의 출력 특성 분석에 관한 연구

최원용¹, 이재형², 좌성훈^{1,a}

¹ 서울과학기술대학교 나노IT디자인 융합기술대학원

² 성균관대학교 전자전기공학부

A Study on the Analysis of the Output Characteristics of the Floating Photovoltaic System

Won Yong Choi¹, Jae-Hyeong Lee², and Sung-Hoon Choa^{1,a}

¹ Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 01811, Korea

² School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received February 23, 2016; Revised March 3, 2017; Accepted March 6, 2017)

Abstract: In this paper, the effects of environmental variables on the output of the floating photovoltaic water systems, which were installed at the Hapcheon dam in South Korea, were investigated, and the correlations between them were analyzed. The system output was linearly proportional to the solar radiation or irradiance. The output was large in spring and autumn because of high irradiance, but low in the summer when the solar module temperature was high. The influence of the module temperature on the system output was limited in the summer, during which the module temperature change affected the system output more than the change of the irradiance did. In addition, in winter and summer, the module temperature tended to decrease with increasing windspeed, but windspeed did not affect module temperature significantly in the spring and autumn. On the other hand, in winter and spring, the irradiance decreased as the windspeed increased because of movement (or circulation) of the photovoltaic modules.

Keywords: Floating photovoltaic system, Solar cell module, Output characteristics, Renewable energy, Environmental variables

1. 서론

지속가능한 에너지원 확보 및 지구 환경문제 대응을 위해 태양광과 같은 신재생에너지를 활용한 발전이 빠르게 보급되고 있다. 그러나 태양광발전 시스템 설치하는 많은 면적의 부지를 필요로 하는데, 국토가 좁은 우리나라

라는 설치 면적의 확보를 위해 산림과 농지를 주로 이용하게 된다. 그 결과 산림훼손과 자연환경 파괴는 결국에는 더 큰 환경재앙을 가져올 우려가 있다. 최근 들어 많은 관심을 받고 있는 수상 태양광발전 시스템(floating photovoltaic system)은 수면 위에 태양광 모듈을 설치하는 기술로서 국토의 효율적인 이용과 발전을 위한 육상 태양광발전 시스템의 대안 기술로 떠오르고 있다 [1,2]. 따라서 현재 미국, 호주, 일본, 이탈리아, 한국 등을 중심으로 다양한 수상 환경에 설치되어 운영되고 있다 [2-4].

수상태양광발전은 수상이라는 특수 조건하에서 태양

a, Corresponding author; shchoa@seoultech.ac.kr

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

광발전 설비가 운영되기 때문에 일사 세기(irradiance) 또는 일사량(irradiation) 및 모듈 온도뿐만 아니라, 육상에 설치된 시스템과는 달리 수면의 유동 또한 발전량에 큰 영향을 미치게 된다 [5]. 즉, 태양광발전 시스템에서 출력 또는 발전량에 직접적 영향을 주는 요소는 일사량과 모듈온도이지만, 이들 요소는 풍속, 운량, 수온 등의 기후인자와 밀접한 관계를 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 수상 태양광시스템의 발전량에 영향을 주는 인자와 이 인자들 간의 상호 연관성에 대해 조사하였다. 이를 위해 합천댐에 설치된 100 kW급 수상 태양광발전 시스템으로부터 3년간('13.1~'15.12) 수집된 기후 데이터들과 발전량을 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 2011년에 합천댐에 설치된 100 kW급 수상 태양광발전시스템을 이용하여 출력특성을 분석하였다. 이 시스템은 내구성, 부식성, 시공성, 경제성 등을 분석하기 위하여 철 및 FRP, 알루미늄 등 다양한 종류의 소재를 채택하여 구조체를 제작하였고, 연중 40 m에 달하는 수위 변화에 대응하기 위해 다중침자 계류방식을 적용하였다. 전체 구조체는 철 구조체 4개 유닛, FRP 구조체 4개 유닛, 알루미늄 구조체 1개 유닛 총 9개 유닛을 서로 연결한 형태로 가로 67.5 m×세로 25 m이며, 발전용량은 99.36 kW이다. 그림 1은 합천댐에 설치된 100 kW급 수상 태양광발전 시스템 사진을 나타낸 것이다.

수상 태양광발전 시스템의 구성 요소로는 태양광 모듈 및 태양광 모듈을 수면 위로 부상시키기 위한 부유체



Fig. 1. Floating photovoltaic (PV) system of 100 kW installed at Hapcheon dam in 2011.

Table 1. Specification of solar cell module for the floating PV system.

Specification	Value
Maximum output power	240 W
Open-circuit voltage	37.9 V
Maximum operation voltage	29.8 V
Short-circuit current	8.61 A
Maximum operation current	8.18 A
Efficiency	14.89%
Dimension(L×W×T)	1,648×981×40 mm
Weight	22.5 kg

Table 2. Specification of the floating PV system installed at Hapcheon dam.

Specification	Value
Facility capacity	99.3 kW
Number of PV module	414 EA (240 W)
Installation angle of PV module	33° south direction (fixed)
Number of PV array	2 arrays: 19 (series) and 10 (parallel) 1 array: 17 (series) and 2 (parallel)
Inverter capacity	2 EA of 50 kW

또는 구조체, 바람이나 유체의 유동으로 인하여 방향이 변하지 않도록 고정하는 계류장치, 태양광 모듈 어레이에서 생산된 DC 전압 및 전류를 처리하기 위한 접속반, 각종 센서들에서 취득한 데이터를 처리하여 원격으로 전송하는 제어반(control panel), 생산된 전력을 교류로 변환하여 계통에 접속시키기 위한 인버터(inverter panel) 등이 있다. 표 1 및 2는 설치된 모듈 사양과 수상 태양광 시스템 구성을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 2013년 한 해 동안의 합천 100 kW급 수상 태양광발전 시스템의 평균 일사 세기(irradiance)와 출력 사이의 관계를 나타낸 것이다. 데이터는 오전 5시부터 오후 7시까지 1시간 평균값이 수집되었다. 일사 세기는 태양 에너지를 수치적으로 나타낸 것으로 태양광발전시스템 분석에 있어 가장 중요한 파라미터이다. 합천댐 지역의 월별 평균 일사 세기를 분석해 보면 대체로

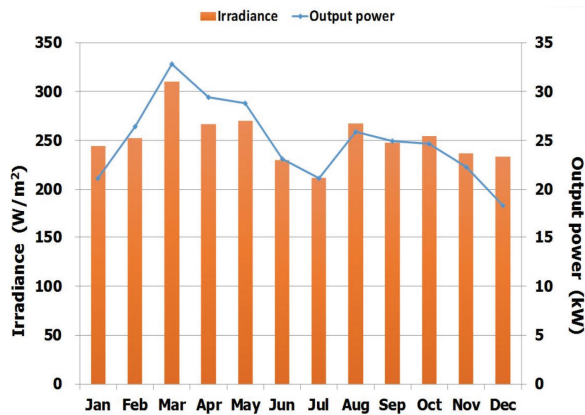


Fig. 2. Average irradiance and output power of the floating PV system installed at Hapcheon-dam. The data were measured during the period of the year 2013.

봄과 가을에 높은 값을 나타내었다. 또한 일사 세기가 증가하면 시스템 출력은 증가하는 비례하는 관계를 나타냄을 알 수 있다. 1년 중 출력이 가장 큰 시기는 봄인 3월에서 5월 사이이다. 통상적으로는 여름이 태양 고도의 차이에 따라 일사 세기가 높기 때문에 출력도 가장 클 것이라고 예상하지만 6월 및 7월에는 일사 세기와 출력이 연중 가장 작다. 이는 6월 하순에서 7월 중순까지 이어지는 장마로 인해 운량, 풍속 등의 기상요소가 일사 세기에 영향을 주기 때문이다. 실제 한 해 동안 풍속이 가장 낮은 3월에 가장 일사 세기가 큰 것으로 조사되었다.

그림 3은 일사 세기와 수상 태양광발전 시스템 출력 사이의 관계를 나타낸 것이다. 모듈 온도의 영향을 배제하기 위해 2013년부터 2015년 데이터 중 일정 온도 범위 (25~26°C) 내의 데이터만을 추출하여 분석하였다. 그림으로부터 시스템 출력은 일사 세기에 선형적으로 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 일정 세기 이상의 빛이 조사될 때 태양전지 (또는 모듈)의 개방전압(open-circuit voltage, V_{oc})은 빛 세기에 관계없이 거의 일정하지만 단락전류(short-circuit voltage, V_{sc})는 다음 수식에서와 같이 일사 세기에 따라 거의 선형적으로 증가한다 [6-8].

$$I_{sc} = I_{scr} \left(\frac{G}{G_r} \right) \quad (1)$$

여기서 I_{sc} 는 일사 세기와 관련된 단락전류, I_{scr} 는

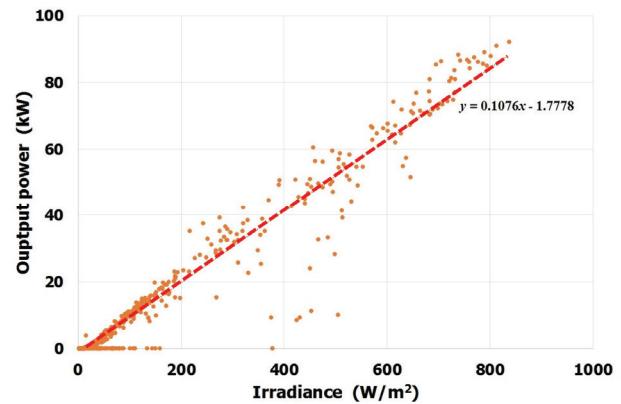


Fig. 3. Correlation between irradiance and output power of the floating PV system installed at Hapcheon-dam. The data were measured during the period of the year 2013-2015, and the range of PV module temperature was about 25~26°C.

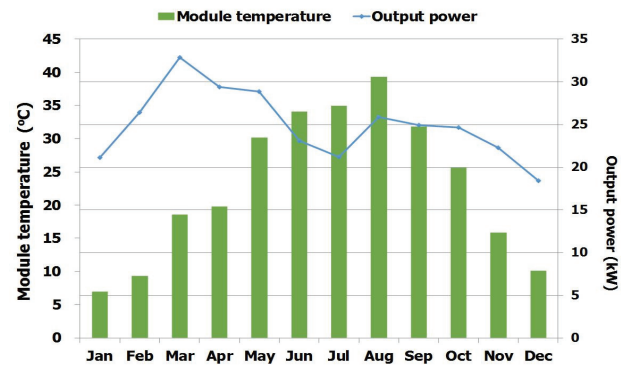


Fig. 4. Average PV module temperature and output power of the floating PV system installed at Hapcheon-dam. The data were measured during the period of the year 2013.

STC (standard test condition, 1000 W/m², AM1.5, 25°C)에서의 단락전류, G_r 은 STC에서의 일사 세기, 즉 1,000 W/m²이다.

그림 4는 수상 태양광 시스템의 2013년 한 해 동안의 월 평균 태양전지 모듈 온도 및 출력을 나타낸 것이다. 1월부터 3월까지의 모듈 온도 증가에 따라 시스템 출력이 증가하지만, 4월부터 7월까지의 출력은 감소함을 볼 수 있다. 연 중 8월이 가장 높은 모듈 온도를 나타내었고, 출력 또한 7월에 비해 증가하였다. 또한 9월부터 12월까지는 모듈 온도가 감소에 따라 시스템 출력이 감소하였다. 태양전지의 온도에 따른 특성변화는 온도계수

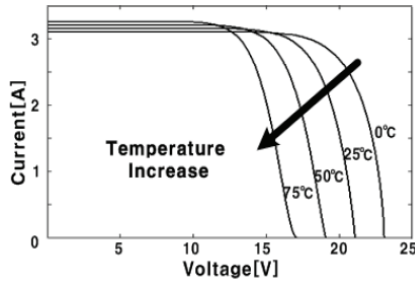


Fig. 5. Photo voltage-current characteristics of solar cells measured at different temperatures [9].

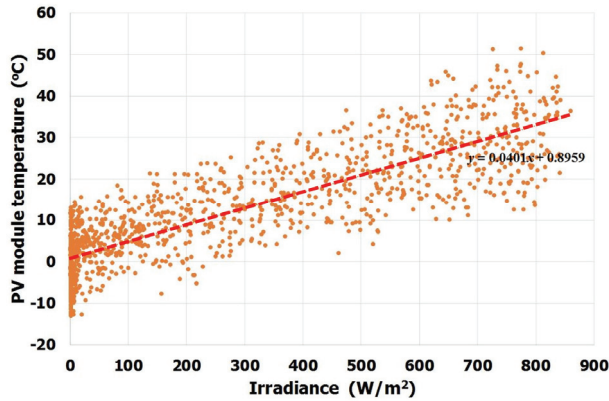


Fig. 6. Correlation between irradiance and PV module temperature of the floating PV system installed at Hapcheondam. The data were measured from January to March in 2013.

(temperature coefficient)를 사용하여 다음 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{oc}(T) = V_{ocr} + \beta(T - 25) \quad (2)$$

$$I_{sc}(T) = I_{scr} [1 + \alpha(T - 25)] \quad (3)$$

$$I_{mp}(T) = I_{mpr} [1 + \alpha(T - 25)] \quad (4)$$

$$V_{mp}(T) = V_{mpr} + \beta(T - 25) \quad (5)$$

여기서 I_{scr} 과 V_{ocr} 은 각각 STC에서의 단락전류와 개방전압이고, α 는 단락전류 온도 계수, β 는 개방전압 온도 계수이다. 수식으로부터 단락전류와 개방전압 모두 온도에 따라 변화됨을 알 수 있다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 일반적으로 단락전류의 온도 계수는 양수, 개방전압의 온도 계수는 음수 값을 가지는데, 모듈 온도 상승에 따라 단락전류는 미세하게 증가하지만 개방전압은 상대적으로 큰 폭으로 감소하여 출력이 저하된다. 따라

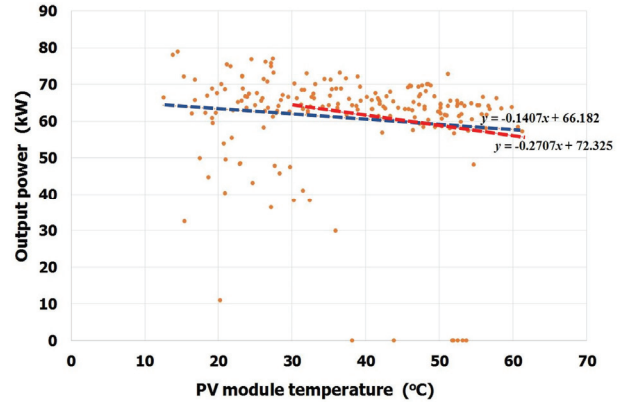


Fig. 7. Correlation between PV module temperature and output power of the floating PV system at the given irradiance (590~610 W/m²). The data were measured during the period of the year 2013~2015.

서 그림에서 1월부터 3월까지의 출력증가는 모듈 온도 변화가 아닌 다른 요인 때문이다.

태양전지 모듈의 효율 또는 출력은 온도뿐만 아니라 일사 세기에도 민감하게 변화하는데, 그림 6은 1월부터 3월까지의 모듈 온도와 일사량과의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림으로부터 일사량 증가에 따라 모듈 온도가 증가함을 볼 수 있다. 온도 및 일사량의 변화에 따른 단락전류는 식 (1) 및 (3)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ph} = I_{scr} \frac{G}{1000} + I_{scr} \alpha (T - 25) \quad (6)$$

따라서 이 기간 동안 모듈온도 증가에 따른 단락전류의 감소보다 일사량 증가에 따른 상승분이 더욱 커서 태양광시스템의 출력이 증가한 것으로 생각된다.

그림 7은 수상 태양광 시스템 출력에 미치는 모듈 온도의 영향을 조사하기 위해 일정 일사 세기(590~610 W/m²)에서의 모듈 온도와 시스템 출력 사이의 관계를 나타낸 것이다. 모듈 온도가 30°C 이하인 경우, 그림에서 볼 수 있듯이 온도와 출력 사이에 큰 상관관계가 없으나, 그 이상의 높은 온도 영역에서는 모듈 온도 증가에 따라 시스템 출력이 감소하는 경향을 나타낸다. 앞서 언급했듯이 수상 태양광 시스템은 수분 증발에 따른 냉각효과로 인해 육상 태양광발전시스템보다 높은 발전량을 나타낸다 [2]. 그러나 이러한 효과를 나타내는 모듈 온도는 30°C 이상이고, 이 온도범위에 해당하는 기간은

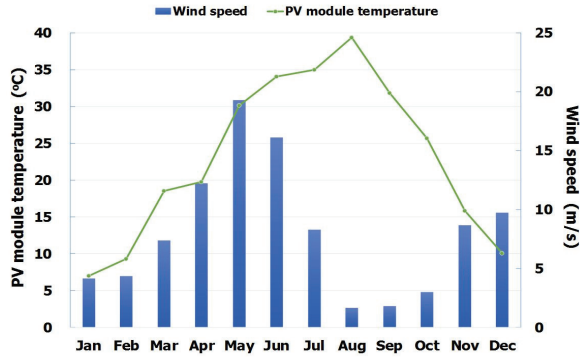


Fig. 8. Average PV module temperature and wind speed of the floating PV system installed at Hapcheon-dam. The data were measured during the period of the year 2013.

그림 4에서 볼 수 있듯이 6월에서 9월까지이다. 따라서 이러한 결과들을 통해 시스템 출력에 미치는 온도 영향은 여름철에 국한됨을 알 수 있다.

태양광 시스템의 출력은 식 (4)에서 알 수 있듯이 모듈 온도 및 일사 세기에 동시에 영향을 받는다. 더 큰 영향을 미치는 인자를 찾기 위해 일사 세기와 모듈 온도의 영향을 나타내는 식 (4)의 우변 첫 번째 항과 두 번째 항의 기울기를 비교하면 되는데, 합천댐에 설치된 100 kW급 수상 태양광발전 시스템에 사용된 모듈의 단락전류는 I_{scr} 8.61A, 단락전류 온도 계수 α 는 0.0386% /°C 이고, 이 값을 식 (4)에 대입하면 첫 번째 항보다 두 번째 항의 기울기가 더 크며, 이는 그림 6과 7의 기울기 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 따라서 일사 세기의 변화보다 모듈 온도 변화가 시스템 출력에 더 큰 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.

그림 8은 2013년 월 평균 태양전지 모듈 온도 및 풍속을 나타낸 것이다. 모듈 온도는 8월이 가장 높았으며, 풍속은 5월이 가장 큰 것으로 조사되었다. 일반적으로 풍속이 증가하면 바람에 의한 냉각효과로 인해 모듈 온도가 감소할 것으로 생각되지만, 그림 8에서는 이러한 경향을 나타내지 않는다. 수상태양광시스템은 육상시스템과는 달리 땅에 고정되어 있지 않고 물 위에서 수위 변동, 바람, 파도, 조류 등에 의해 움직이므로 풍속이 강하면 태양광 모듈을 지지하고 있는 부력체가 정남향으로부터 이동 또는 회전하여 일사세기, 특히 경사 일사세기가 변화된다. 따라서 풍속은 모듈 온도뿐만 아니라 일사세기에도 영향을 주게 된다.

그림 9는 일정 일사세기(550~600 W/m²)에서 기후

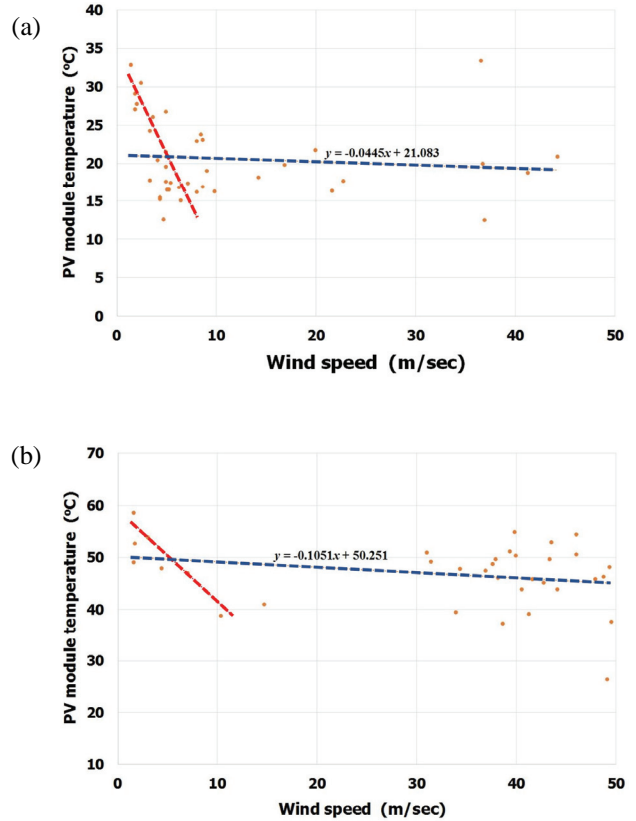


Fig. 9. Correlation between PV module temperature and wind speed of the floating PV system at the given irradiance (550~600 W/m²) and for given duration: (a) from Dec. to Feb., (b) from Jun. to Aug. The data were measured during the period of the year 2013~2015.

조건이 비슷한 계절별 모듈 온도 및 풍속과의 상관관계를 나타낸 것이다. 겨울에 해당하는 12월에서 2월, 여름에 해당하는 6월에서 8월까지의 풍속 증가에 따라 모듈 온도가 감소하는 경향을 보였다. 특히, 풍속이 10 m/sec 이하에서 풍속에 대한 모듈 온도 의존성이 매우 큼을 알 수 있다. 그러나 봄 및 가을에 해당하는 3월에서 5월, 9월에서 11월의 기간에는 별다른 상관관계를 나타내지 않았다.

그림 10은 수상태양광시스템의 동절기와 봄 기간 동안 일사세기와 풍속 사이의 관계를 나타낸 것이다. 풍속이 증가함에 따라 일사세기가 감소함을 볼 수 있는데, 앞서 언급했듯이 풍속 증가에 따라 시스템 구조물 또는 태양광 모듈의 방향이 정남향으로부터 벗어나 이동하기 때문으로 생각된다. 그러나 여름(6~8월)이나 가을(9~11월) 기간에는 두 파라미터 사이에 별다른 경향성을 나타내지 않았다.

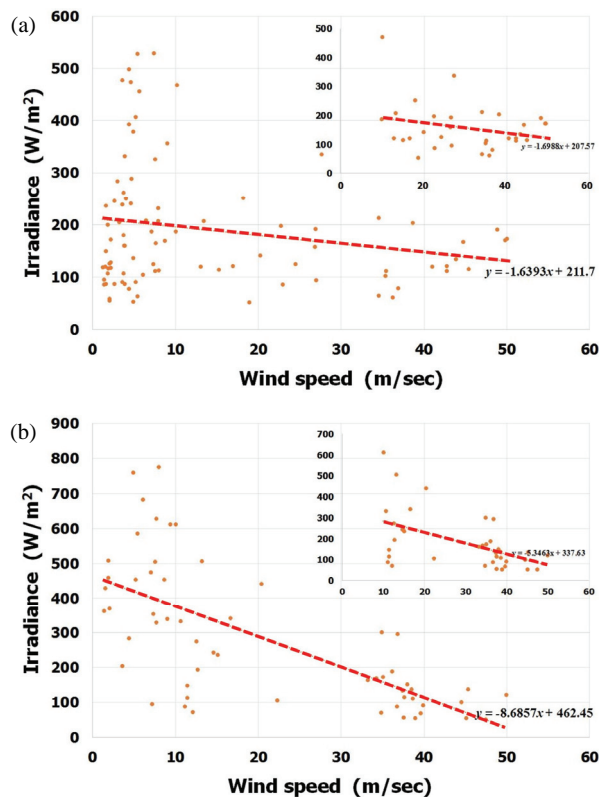


Fig. 10. Correlation between irradiance and wind speed of the floating PV system at given module temperature and for given duration. (a) 7~9°C, from Dec. to Feb. and (b) 24~26°C, from Mar. to May. The data were measured during the period of the year 2013~2015.

4. 결론

본 논문에서는 수상태양광발전시스템의 출력에 미치는 환경변수들을 조사하고 이들 사이의 상관관계를 분석하였다. 일사세기와 시스템 출력은 선형적으로 비례하는데, 일사량이 많은 큰 봄과 가을에 시스템 출력이 크며, 태양광 모듈 온도가 높은 여름에는 발전량이 낮았다. 시스템 출력에 미치는 모듈온도 영향은 여름철에 한정되며, 이 기간에는 일사세기의 변화보다 모듈 온도 변화가 시스템 출력에 더 큰 영향을 미치는 요소임을 알

수 있었다. 또한 겨울 및 여름에는 풍속 증가에 따라 모듈 온도가 감소하는 경향을 보였으나, 봄과 가을에는 풍속이 모듈 온도에 큰 영향을 미치지 않았다. 한편, 겨울과 봄에는 태양광 모듈 이동에 의해 풍속이 높아짐에 따라 일사세기가 감소하였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구 결과입니다.

REFERENCES

- [1] S. Y. Kim, *A Study on the Efficiency Analysis of Rotary Type Floating Photovoltaic Power Generation System*, p. 2, Hanyang University, Seoul (2015).
- [2] Y. K. Choi, W. S. Choi, and J. H. Lee, *Sci. Adv. Mater.*, **8**, 681 (2016) [DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/sam.2016.2529>]
- [3] C. Ferrer-Gisbert, J. J. Ferrán-Gozálvez, M. Redón-Santafé, P. Ferrer-Gisbert, F. Sánchez-Romero, and J. B. Torregrosa-Soler, *Renewable Energy*, **60**, 63 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.04.007>]
- [4] K. Trapani and M. R. Santafé, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **23**, 524 (2015) [DOI: 10.1002/pip.2466]
- [5] H. C. Choi, *An Empirical Study for Operating Characteristics Analysis of 100 (kW) Floated Photovoltaic System*, p. 2, Hanyang University, Seoul (2014).
- [6] Ahmed A. EL TAYYAN, *Turkish J. Phys.*, **37**, 121 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.3906/fiz-1206-4>]
- [7] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems* (John Wiley & Sons, Hoboken N. J. 2004). [DOI: <https://doi.org/10.1002/0471668826>]
- [8] The German Energy Society (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, DGS), *Planning and Installing Photovoltaic Systems : A Guide for Installers, Architects, and Engineers, 2nd ed.*, (Earthscan, 2008), p. 60.
- [9] G. H. Choe, B. H. Jeong, B. H. Kang, and M. U. Lee, *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, **11**, 79 (2006).