

부유식 태양광 발전기의 패널과 부유체에 작용하는 풍하중과 유동특성

유대겸, 이계복*
충북대학교 기계공학부

Flow Characteristics and Wind Loads on the Solar Panel and Floating System of Floating Solar Generato

Dae-Gyeom Ryu, Kye-Bock Lee*
School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

요약 지구 환경문제와 자원 고갈에 따른 에너지 위기로 인해 화석 연료를 사용하지 않아 이산화탄소와 같은 온실가스 배출이 없는 청정 에너지원으로서 신재생 에너지는 중요성이 강조되고 있다. 부유식 태양광발전은 기존의 태양광 발전기술과 플로팅 기술을 융합한 신개념의 발전 방식이다. 종래의 육상이나, 건축물이 아닌 유희수면에 설치하는 재생에너지원으로 구조체, 계류장치, 태양광 발전설비, 수중케이블 등으로 구성된다. 또한 단위모듈 형태로 설계되어 발전용량에 따라 단위모듈을 서로 연결하여 대규모 발전 시설을 조성할 수 있다. 태양광 발전기는 옥외에 설치되기 때문에 구조물에 대한 풍하중의 영향이 매우 크다. 본 연구에서는 부유식 태양광 발전 구조물에 큰 영향을 주는 풍하중을 전산유체역학을 통해 해석하였다. 유동 특성과 풍하중에 대한 풍향과 경사각의 영향을 분석하였다. 모듈의 개수와 바람의 방향에 따라 최대 하중을 받는 위치와 크기 그리고 태양광 패널과 부유체 주위의 유동 특성을 구하였다. 태양광 패널의 지면에 대한 경사각이 클수록 풍하중은 증가하였다.

Abstract A floating photovoltaic generation system is a new concept that combines existing photovoltaic generation technology with floating technology. This is installed in the water not on conventional land and a building. The system is designed as a unit module type that can be connected to other modules according to the power generation capacity, thereby forming a large-scale power generation facility. As a renewable energy source, it is composed of a floating structure, mooring device, photovoltaic power generation facility, and underwater cable. Because this system is installed outdoors, the effect of the wind load on the structure is very large. In this study, the wind loads most affected on the floating photovoltaic generation structure were obtained by computational fluid dynamic analysis. The flow characteristics and wind loads were analyzed for a range of wind orientations and angles of inclination. The analysis showed the position and magnitude of the maximum wind load to the wind direction and the flow characteristics around the solar panel and floating system. The wind load increased with increasing angle of inclination of the panel to the ground.

Keywords : Computational Fluid Dynamics, Floating Photovoltaic Solar Generator, Photovoltaic Panel, Wind Load, Wind Orientation

*Corresponding Author : Kye-Bock Lee(Chungbuk National Univ.)
email: kblee@chungbuk.ac.kr

Received June 27, 2019
Accepted October 4, 2019

Revised August 2, 2019
Published October 31, 2019

1. 서론

지구환경문제와 자원고갈에 따른 에너지 위기로 인해 신재생에너지의 중요성이 강조되고 있다. 화석연료를 사용하지 않아 이산화탄소와 같은 온실가스 배출이 없는 청정에너지원으로서 신재생에너지원은 환경 친화적 에너지이면서 전력량 증가에 큰 효과가 기대되어 미래 에너지원으로 중요성이 증가하고 있다[1]. 정부는 2012년부터 신재생에너지 의무 할당 제도를 도입하여 일정규모 이상의 발전설비를 보유한 발전사업자에게 총 발전량의 일정량 이상을 신재생에너지로 생산한 전력으로 공급하도록 의무화 하도록 하였다.

태양광 발전은 화석연료를 대체할 에너지원으로 주목 받고 있으며 정부에서도 별도 의무공급량을 지정할 정도로 태양광 발전을 육성하고 있다. 태양광 발전의 효율을 높이기 위해서는 많은 요소를 고려하여야 한다. 그 중 가장 큰 영향을 미치는 것은 태양광 패널이 항상 태양광을 많이 받을 수 있게 유지되도록 설계된 구조물의 안정성이다. 또한 실외에 설치되므로 자연환경에 그대로 노출되므로 풍하중에 따른 외력에 견딜 수 있도록 충분한 강도가 확보되어야 한다. 바람에 의한 힘을 나타내는 풍하중은 태양광 발전기를 설계할 때 큰 힘을 갖기 때문에 중요하고 구조물이 바람에 의해 받게 되는 항력이 중요한 풍하중에 해당된다. 태양광 발전 사업의 확대에 따라 지반 침하, 산사태, 환경파괴 문제 등 태양광 발전소의 건설에 관한 문제점이 크게 대두되었다. 따라서 최근에는 이러한 태양광 발전의 문제점을 해결하고 좁은 국토의 상황을 고려해 효율적인 국토 이용을 위해 수면 위에 대규모 부유식 태양광 에너지 발전시설을 조성하고 있다[2,3].

수상태양광 발전 기술은 유류 저수지 수면 위에 태양광발전 설비를 설치하는 기술로서 산지나 농경지의 훼손을 동반하지 않아 국토가 협소한 우리나라에 맞는 신에너지 기술이다[4-7]. 수상태양광발전은 기존의 태양광 발전기술과 플로팅 기술을 융합한 신개념의 발전방식이다. 종래의 육상이나, 건축물이 아닌 댐의 유류수면에 설치하는 재생에너지원으로 구조체, 계류장치, 태양광발전설비, 수중케이블 등으로 구성된다. 단위모듈 형태로 설계되어 발전용량에 따라 단위모듈을 서로 연결하여 대규모 발전시설을 조성할 수 있도록 설계되었다. 단위모듈의 구성은 크게 태양광판(Photovoltaic Panel), 이를 지지하는 지지시스템(Supporting System) 및 부유시스템(Floating System)으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 풍하중을 받는 부유식 태양광 모듈과

부유체 주위에 대한 전산유체해석을 수행하여 풍력으로 인한 수상태양광의 부유체 및 모듈에 작용하는 항력과 유동 특성을 해석하였다. 또한 풍력 방향에 따른 부품별 최대항력의 위치와 크기를 비교하고 태양광 패널의 경사 각도와 모듈의 개수에 따른 영향을 평가하고 설계 기본 자료를 도출하였다.

2. 이론적 해석

수상태양광발전은 기존의 태양광 발전기술과 플로팅 기술을 융합한 신개념의 발전방식으로 단위모듈 형태로 설계되어 발전용량에 따라 단위모듈을 서로 연결하여 대규모 발전시설을 조성할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서 고려하는 단일 태양광모듈과 부유체 구조는 Fig. 1에 나타냈다. 태양광 패널의 크기는 992x1972x35 (mm)이다. 해석을 수행하는 5x5 태양광 모듈의 형상과 부유체 구조는 Fig. 2와 같다.

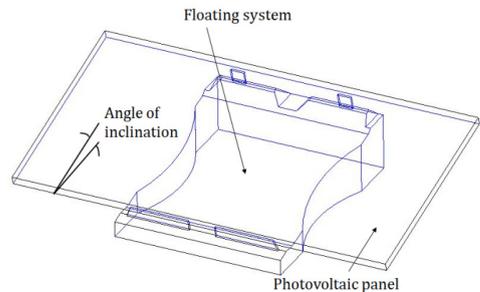
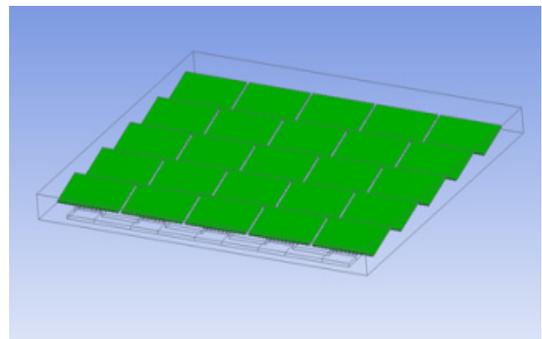
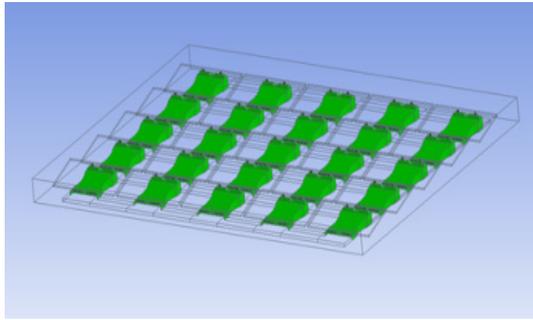


Fig. 1. Schematic of solar photovoltaic panel and floating system



(a) Panel



(b) Floating structure

Fig. 2. Structure of solar photovoltaic panel and floating system of 5x5 floating solar generator

2.1 지배방정식

3차원 비압축성 정상 유동에서의 연속 방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

- 연속방정식(continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

- 운동량 방정식(momentum equation)

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

ρ =유체밀도, p =압력, U_i =평균속도, u_i =요동속도

태양광 모듈 주위에서의 유동은 층류가 아닌 난류유동 이므로 이러한 난류의 효과를 해석하기 위해서는 난류 현상 및 난류 모델에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 여러 난류 모델 들 중에서 박리와 후류유동을 정확하게 예측할 수 있는 Realizable k - ϵ 난류 모델을 사용하였고 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\epsilon}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (4)$$

여기서, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, $G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\epsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), C_2 = 1.9$$

위의 방정식에서 k 는 난류 운동에너지(turbulence kinetic energy)를 말하며, ϵ 는 소멸률(dissipation rate)을 나타낸다. G_k 은 평균 속도 구배에 의한 난류 운동에너지의 발생을 나타내며, C_1 와 C_2 는 모델상수를 나타낸다.

2.2 경계조건 및 격자생성

본 연구에서 사용한 전산유체해석은 유한체적기법(FVM, Finite Volume Method)을 이용한 프로그램인 FLUENT를 사용하였다[8]. 경계조건은 입구는 속도조건, 출구에서는 압력조건을 적용하였다. 상부는 대칭(symmetry) 조건을 사용하기 위해 충분히 높게 영역을 잡았고 하부는 고정된 벽으로 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다. Figs. 3, 4는 부유식 태양광 발전기 주위의 유동 해석영역과 주요부분의 경계조건을 나타낸다.

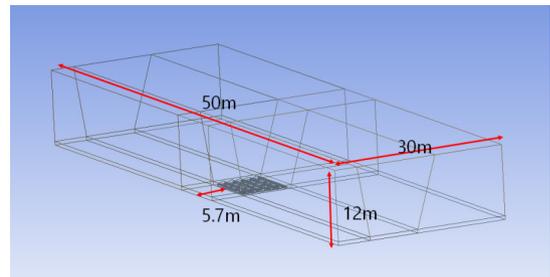


Fig. 3. 5x5 floating solar generator module flow analysis area

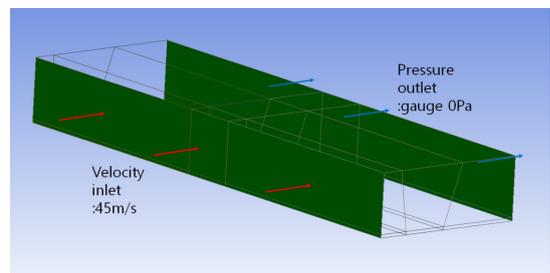


Fig. 4. Inlet and exit boundary condition

Fig. 5는 격자구조를 나타낸다. 해석영역 대부분에 대해서 해석시간 및 격자수를 줄이기 위해서 육면체(hexa)

격자를 구성하였다. 부유체와 패널이 있는 부분에 대해서 육면체 격자를 구성하기 어려운 점을 감안하여, 중심 영역에만 국부적인 사면체(tetra) 격자를 구성하였다. 벽(wall) 조건에 알맞은 격자를 구성하기 위해서 육면체 격자의 경우 그대로 유지하고, 사면체 격자의 경우 부풀림(inflation) 기능을 사용하여 프리즘(prism) 격자를 형성한 후 벽조건과 난류모델이 잘 부합하도록 하였다. 항력에 큰 영향을 미치는 영역인 후류영역(wake region)에서도 격자를 조밀하게 구성하였다. 벽이 존재하는 모든 위치에서 벽함수(wall function)를 사용하지 않고 벽으로부터의 첫 번째 노드점의 y^+ 가 대수함수(logarithmic function)의 속도분포를 갖는 난류영역에 위치하도록 11.225 보다 크도록 격자를 구성하였다.

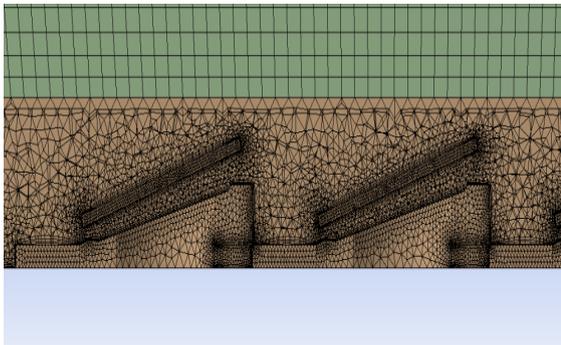


Fig. 5. Mesh structure of floating solar generator

Fig. 6에 나타난 태양광 패널이 받는 평균항력에 대한 격자수의 민감도 분석을 수행하여 전체 격자수를 2,000 만개로 하였다.

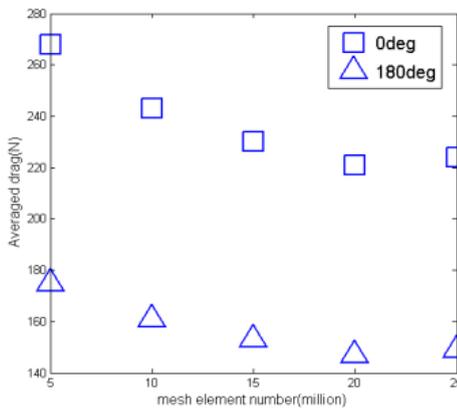


Fig. 6. Grid dependency test on different mesh number

3. 해석결과 및 고찰

태양광 모듈이 3x3과 5x5로 배열된 상태에서 경사각도 15° 경우에 대하여 바람이 태양광 모듈의 전면(180°)에서 불어오는 경우를 포함한 각도가 0°, 40°, 60°, 90°, 120°, 140°, 180°, 220°, 340°의 경우에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 7은 바람의 방향을 나타내는 각도를 표시한다.

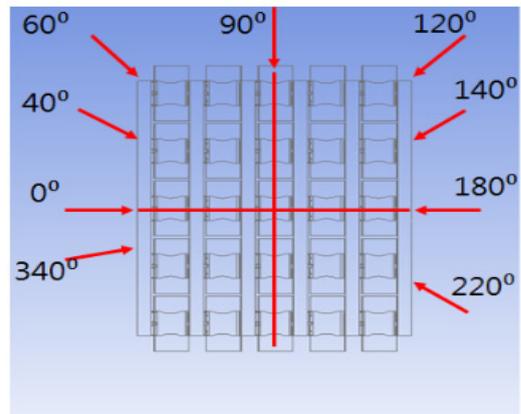


Fig. 7. Wind direction acting on panel

Fig. 8은 태양광 모듈 유동장 해석 영역에서 상부에 해당하는 부분의 속도분포로 거의 모든 영역에서 1% 오차 범위에서 45 m/s를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 상부에서 대칭조건(symmetry condition)인 균일 속도를 만족하는 것을 알 수 있다.

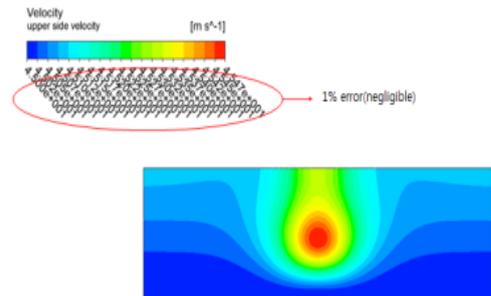


Fig. 8. 5x5 Velocity distribution in upper area of 5x5 module of floating solar photovoltaic generator

Fig. 9는 바람 방향 180°의 경우에 대해 태양광 모듈 주위의 속도벡터를 나타낸다. 태양광 패널 뒤쪽에서 박리와 역류가 발생하는 것을 알 수 있다. 바람의 방향에 따

라 유동특성을 해석하여 태양광 패널에 작용하는 압력과 전단력을 구하여 항력을 계산할 수 있다. 항력의 최대값과 항력분포는 구조해석 설계의 입력자료로 활용되어 태양광 패널에 사용된 재료의 응력 계산을 통해 설계의 안전성 검증에 사용된다.

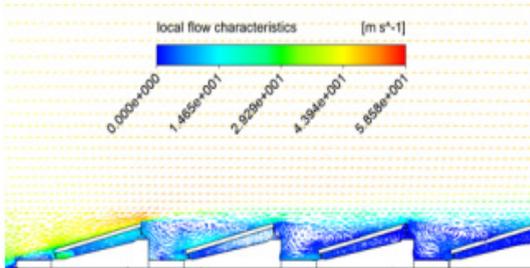
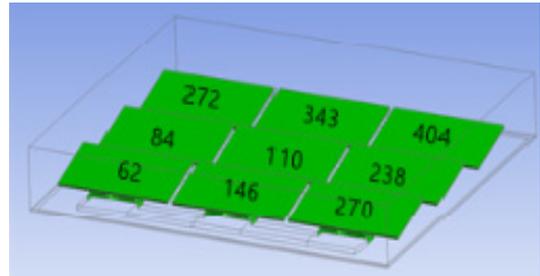
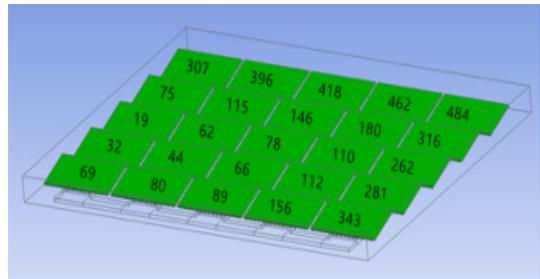
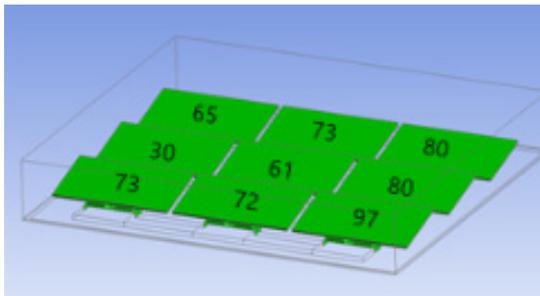
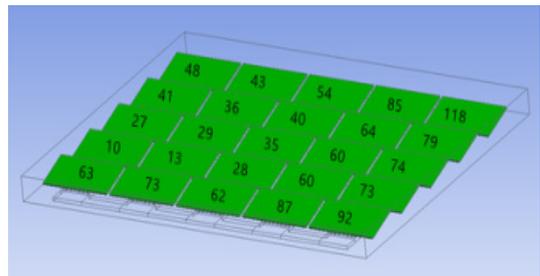


Fig. 9. Velocity vector around the photovoltaic panel and floating system

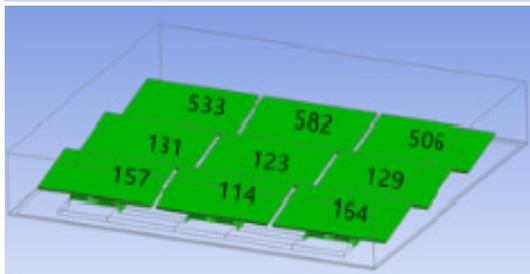
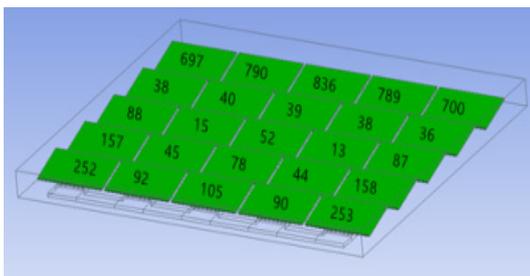
Fig. 10은 태양광 모듈이 3x3 과 5x5로 배열된 상태에서 바람이 태양광 모듈의 전면에 대해 0°, 40°, 120°, 180° 에서 불어오는 경우에 대해 각 패널에 작용하는 항력의 크기를 나타낸다. 모든 풍향에 대해서 속도를 정면으로 받는 패널 부분에서 항력이 제일 큰 것을 알 수 있다. 최대항력은 바람이 태양광 패널 뒷면에서 불어오는 0°의 경우에 대해 상대적으로 박리영역이 넓은 5x5모듈에서 나타나는 것을 알 수 있다. 모든 경우에 대해 모듈의 가장자리 패널이 아닌 내부 패널의 경우 상대적으로 작은 크기의 항력을 보여준다.



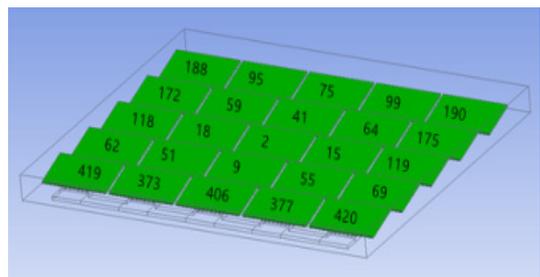
(b) 40°

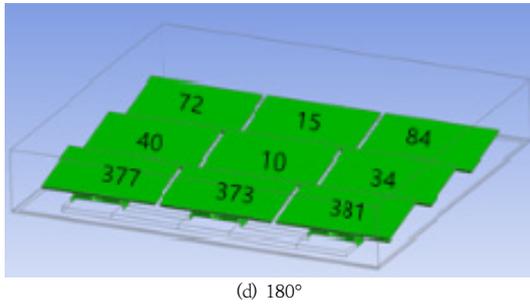


(c) 120°



(a) 0°





(d) 180°

Fig. 10. Drag force(Newton) acting on the panels for various wind orientation

Table 1은 태양광 모듈이 3x3과 5x5로 배열된 상태에서 경사각도 15° 경우에 대하여 바람이 전면(180°)에서 불어오는 경우를 포함한 각도가 0°, 40°, 60°, 120°, 180°의 경우에 대해 태양광 패널이 받는 항력의 최대값과 평균값 그리고 표준편차를 나타낸다. 표준편차가 클수록 각 패널에 작용하는 항력의 차이가 큰 것을 나타낸다. 5x5로 배열된 경우가 3x3로 배열된 경우와 비교해 모듈의 개수가 증가할수록 항력의 최대값이 1.54배까지 증가하는 것을 보여준다.

Table 1. Average, maximum and standard deviation of drags acting on solar panels

Spec.		Mean (Newton)	Maximum (Newton)	STD
3x3 module	0	270.8	581.6	203.5
	40	214.3	404.1	120.2
	60	102.1	165.8	48.1
	120	70.2	96.85	18.3
	180	154.1	381.2	168.9
5x5 module	0	221.5	836.4	284.2
	40	188.2	483.7	146.1
	60	94.7	254.9	78.0
	120	55.8	118.1	26.1
	180	146.8	419.6	139.5

경사각도 22°인 태양광 모듈이 5x5로 배열된 상태에서 바람이 태양광 모듈의 전면에 대해 0°, 60°, 120°, 180°에서 불어오는 경우에 대해 작용하는 항력의 최대값과 평균값 그리고 표준편차를 구한 결과를 Table 2에 나타냈다. 22°의 경사 각도를 갖는 경우가 15°와 비교해 박리영역이 증가되어 평균항력과 최대항력은 각각 1.67배와 1.78배까지 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 바람 방향에 따른 최대 항력 위치는 거의 일치한다.

Table 2. Average, maximum and standard deviation of drags acting on solar panels

22° 5x5 module wind load				
Wind orientation	0	60	120	180
Mean (Newton)	293.6	134.5	94.1	201.5
Maximum (Newton)	1261.4	378.5	210.7	732.9
STD	467.3	121.5	55.7	284.9

4. 결론

태양광 패널 구조물에 가장 영향이 큰 풍하중을 구하기 위해 전산유체해석을 수행하였다. 태양광 모듈이 3x3, 5x5로 배열된 상태에서 경사각도 15°와 22°인 경우에 대해 바람이 태양광 모듈의 전면(180°)에서 불어오는 경우를 포함한 각도가 0°, 40°, 60°, 90°, 120°, 140°, 180°, 220°, 340°에 대해 태양광 모듈과 부유체가 받는 항력분포와 패널 주위의 유동특성을 구하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전산유체해석을 통해 태양광 패널 뒤쪽에서 박리와 역류가 발생하는 것을 확인하였고 태양광 패널 구조물에 가장 영향이 큰 풍하중을 구하기 위해 풍향과 경사각도에 따른 최대 항력의 크기와 항력분포를 계산하였다. 이 결과는 구조해석 설계의 입력자료로 사용되어 설계의 안전성을 검증하고 태양광 구조물 설계의 안전을 과잉방지 및 최적화를 위한 기본자료로 활용된다.

(2) 모든 풍향에 대해서 속도를 정면으로 받는 패널 부분에서 항력이 제일 큰 것을 알 수 있고 패널에 작용하는 항력의 최대값과 평균값 그리고 항력분포와 표준편차를 구하였다.

(3) 태양광 패널의 지면과의 경사각도가 15°에서 22°로 커지면 박리영역이 증가하면서 최대 항력은 1.78배까지 증가하였다. 그러나 바람 방향에 따른 최대 항력 위치는 거의 일치하였다.

(4) 단위모듈을 연결한 전체 모듈의 개수에 따른 패널에 작용하는 항력의 최대값과 평균값 그리고 표준편차를 구한 결과 모듈의 수가 3x3에서 5x5로 증가하면 항력의 최대값은 1.54배까지 증가하였다.

References

- [1] J. W. Park, U. C. Shin, D. G. Kim, J. H. Yoon, "A Study on Generation Characteristics of Building Integrated Photovoltaic System", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 33, No. 3, pp. 75~81, 2013.
DOI : <https://doi.org/10.7836/kses.2013.33.3.075>
- [2] J. W. Choi., H. Joo, J. Nam, S. T. Hwang, S. J. Yoon, "Performance Enhancement of Floating PV Generation Structure Using FRP", *Composites Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 105~110, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7234/composres.2013.26.2.105>
- [3] S. H. Lee, J. H. Nam, H. J. Joo, S. J. Yoon, "Design of Isolated Floating Type Photovoltaic Energy Generation Structure Using PERP Member", *Proceeding of the 2012 Spring Symposium, Korean Society for Composite Materials, Korea, May, pp. 71~72, 2012.*
- [4] C. W. Son, T. K. Kim, T. I. Seo, "Wind Load Analysis of Structure for Folding Solar Power System", *Journal of Korea Academia- Industrial Cooperation Society*, Vol. 19, No. 8, pp. 1~7, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.8.1>
- [5] Y. E. Kim, K. W. Jeong, J. J. Lee, "Wind Load Analysis for Designing a tracking Solar Generator", *Journal of Korea Academia- Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 672~680, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.2.672>
- [6] Y. G. Lee, H. J. Joo, S. J. Yoon, "Modified Design of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System", *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 1, No. 4, pp. 18~27, 2010.
- [7] H. I. Kim, N. H. Lee, E. C. Lee, D. G. Kim, S. T. Hong, H. H. Lee, J. S. Yi, S. H. Lee, Groundwork research for Commercialization of Floated Photovoltaic System, K-water research report, 2012.
- [8] ANSYS, Inc., ANSYS Workbench User's Guide, Release 15.0, 2013.

이 계 복(Kye-Bock Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1983년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

난류유동, 유체기계, 전산유체

유 대 겸(Dae-Gyeom Ryu)

[준회원]



- 2017년 2월 : 충북대학교 기계공학부 (공학사)
- 2019년 8월 : 충북대학교 기계공학 대학원 (공학석사)

<관심분야>

전산유체, 이상유동