2 MW급 수상태양광 발전 설비의 전체 모듈 해석을 통한 구조 안전성 평가

이창열^{1†} · 이권희² · 심정연³ · 최대한⁴ · 이정호⁴

¹에이블맥스(주), 주임연구원

²에이블맥스(주), 부대표

³에이블맥스(주), 이사

⁴에이블맥스(주), 선임연구원

Structural Safety Evaluation through Full Modules Analysis of 2 WM Class Floating Photovoltaic Power Plant

Lee Chang-Ryeol^{1†} · Lee Gwon-Hee² · Shim Jeong-Yeon³ · Choi Dae-Han⁴ · Lee Jeong-Ho⁴

¹Assistant Research Engineer, Ablemax CO., Ltd

²Vice President, Ablemax CO., Ltd

³Director, Ablemax CO., Ltd

⁴Senior Research Engineer, Ablemax CO., Ltd

[†]Corresponding author: crlee@ablemax.co.kr

Abstract

Unlike land-based photovoltaic power generation systems, floating photovoltaic power generation systems are installed in a reservoir or marine environment and use a floating body and mooring device. Therefore, it is difficult to evaluate structural safety. To evaluate the structural safety of a floating solar power plant, it is necessary to calculate the wind load and wave load in consideration of the floating body, mooring device, and joint. In this study, analysis was performed on the entire model of a 2 MW class floating photovoltaic power plant. To calculate the applied load, a two-dimensional (2D) flow analysis was performed to calculate the wind load acting on the solar panel. Then, wave analysis, including currents, was performed to calculate the wave load acting on the floating body. Through the analysis, the tension and displacement acting on the mooring device generated by the current, wind load, and wave load were confirmed. Finally, structural analysis was performed on the unit where the wind load, current, wave load, and mooring force acted the most. Thus, the structural safety of the floating photovoltaic power generation facility was evaluated.

Keywords: 태양광 발전(Photovoltaic generation), 수상태양광(Floating photovoltaic), 부유체(Floating body), 계류(Mooring), 파랑해석(Wave analysis), 구조적 안전성(Structural Safety)

1. 서론

태양광 발전은 신재생에너지 중 한 분야이며, 지속가능한 발전 시스템으로 많은 관심을 받고 있다¹⁾. 태양광 발전은 육상태양광 발전이 대부분이었지만, 최근에는 수상태양광 발

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.6, pp.109-118, December 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.6.109>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 5 November 2021

Revised: 29 November 2021

Accepted: 29 November 2021

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.

전 또한 늘어나고 있는 추세이다. 수상태양광 발전은 수면 냉각 효과로 인해 육상태양광 발전에 비해 더 높은 발전 효율을 나타낸다. 수상태양광 발전의 경우 육상태양광 발전과 달리 저수지나 해양 환경에 설치되며, 부유체와 계류 장치(Mooring)를 사용한다. 따라서 땅에 설치되는 육상태양광에 비해 구조적 안전성 평가를 하는데 어려움이 있다. 최근 수상태양광 발전설비의 해석적 연구의 필요성이 강조되고 있으며, 이에 따라 관심이 많아지고 있지만 해석에 어려움이 많아서 수상태양광 발전 설비의 구조적 안전성 평가에 대한 연구는 거의 없었다²⁾. 수상태양광 발전 설비의 구조적 안전성 검토를 위해 해석 방법에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

수상태양광 발전 설비의 구조적 안전성 평가를 위해서는 부유체, 계류 장치, 각 유닛(unit)을 연결하는 연결부(Joint)를 모두 고려하여야 하며, 바람에 의해 작용하는 풍하중(Wind load)³⁾, 조류와 파랑에 의해 작용하는 파랑하중(Wave load)에 대한 검토가 필요하다. 이러한 조건을 모두 고려하여 구조해석을 수행하여 구조적 안전성을 평가하여야 한다. 본 논문에서는 2 MW급 수상태양광 발전 설비의 전체 모델에 대해 해석 순서와 해석 방법을 제시하고, 해석을 바탕으로 수상태양광 발전 설비의 구조적 안전성을 검토하였다. 이러한 해석적 연구를 통해 수상태양광 발전 설비의 안전성 검토와 모델의 최적화를 통해 제작비용과 실험을 통한 테스트 시간을 절감할 수 있는 장점이 있다.

2. 해석 방법 및 해석 순서

해석에 사용한 2 MW급 수상태양광 발전 설비는 총 225개의 유닛을 사용하였으며, 15×15로 배치하였다. 상용프로그램인 Tdyn 16.1.0b를 사용하여 해석을 수행하였으며, Tdyn은 한 프로그램으로 유동, 내항성 및 구조해석이 가능하다는 특징이 있다. 본 연구에서는 Tdyn 기능 중 하나인 TCL script를 사용하여 수상태양광 해석에 대해 모델 생성 및 경계 조건 입력을 자동화하여 전처리 과정에 소요되는 시간과 오류를 줄였다. 수상태양광의 경우 기존의 해양 구조물이나 선박과는 달리 각각의 유닛이 조인트를 통해 여러개로 연결되어 있는 구조이며, 유닛의 수가 많을수록 설정해야 되는 조건들의 수가 많아서 해석 조건을 설정하는데 시간이 많이 소요된다⁴⁾. 자동화를 통해 1개의 유닛 형상을 이용하여 전체 모듈에 대한 형상을 자동으로 생성하며, 각 유닛에 대한 정보들과 조인트, 계류에 대한 조건들이 자동으로 입력된다.

해석 순서는 첫 번째로 2D 유동해석을 통해 태풍 조건일 경우의 수상태양광 발전 설비의 패널에 작용하는 풍하중을 각각 계산하였다. 두 번째로 내항성해석을 수행하였으며, 모델의 일부분이 아닌 2 MW급 전체 유닛을 사용하여 해석을 진행하였다. 부유체에 작용하는 파랑하중을 계산하기 위하여 진행하였으며, 조류와 파랑, 부유체, 유닛 사이의 연결부, 계류 등의 환경 조건을 반영하였다. 또한 유동해석으로 얻은 패널에 작용하는 풍하중을 각각의 패널에 외력으로 입력하여 해석을 수행하였다. 이를 통해 조류를 포함한 파랑하중과 계류에 작용하는 장력과 변위를 계산하였다. 마지막으로 가장 큰 하중을 받는 1개의 유닛에 대하여 유동해석과 내항성해석으로 얻은 하중조건을 적용하여 구조해석을 진행하여 구조적 안전성을 판단하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 수상태양광 발전 설비의 유닛의 형상을 나타낸다. 여기서 유닛이란 수상태양광 발전에 필요한 1개의 전체 구조물

을 나타내며, 유닛이 조인트로 연결되어 모듈을 구성한다. 유닛에는 발전에 필요한 태양광 패널과 부유체, 그리고 이를 서로 연결하는 빔으로 이루어져 있다⁵⁾. 1개의 유닛의 크기는 가로 약 9.7 m, 세로 약 6.5 m이다. 부유체의 형상은 제작 업체에 따라 형상과 특성이 모두 다르며, 본 연구에서는 부유체의 형상을 사각형으로 모델링하여 해석을 수행하였다.

Fig. 1 Analysis model of floating photovoltaic power plant

3. 유동해석

3.1 해석 모델 및 경계 조건

Fig. 2와 같이 수상태양광 설비의 패널과 유동 영역을 2D로 모델링하였다. 해석 대상인 패널의 형상이 좌우 대칭 형상이며, 순풍과 역풍 조건에서 주로 최대 하중이 발생하기 때문에 3D 모델을 사용한 해석과 유사한 결과를 얻을 수 있을 것이며 해석의 효율성을 위해 2D 유동해석을 수행하였다. 벽면효과(Wall effect)로 인한 패널 주위의 압력 상승을 방지하기 위하여 충분한 여유 공간을 주어 해석의 정확도를 높였다. 1개의 유닛에 2개의 패널이 위치하기 때문에 해석에 사용된 패널은 총 30개이다. 이때, 패널은 1열당 9개가 설치되지만, 모두 가로로 연결되어 있어서 1열을 1개의 모델로 만들었다. 1열당 패널의 크기는 가로 9.5 m, 세로 약 2 m이다.

작동 유체는 공기(Air)를 사용하였으며, 전면풍 조건으로 해석을 수행하였다. Inlet 조건으로는 Velocity Condition을 사용하였으며, 악조건을 고려하기 위해 최대 풍속을 45 m/s로 설정하였다. Outlet은 Pressure Condition을 사용하여 대기압 조건을 입력하였으며, 수면인 모델의 밑면과 패널면은 각각 벽(Wall)으로 설정

하였다. 마지막으로 모델의 윗면은 Slip Wall로 설정하여 해석을 수행하였다⁶⁾. 각 유닛의 패널에 각각 이름을 따로 설정하였으며, TCL script를 사용하여 내향성해석 단계에서 각 유닛에 맞는 풍하중이 자동으로 외력으로 입력되도록 설정하여 전처리 과정의 소요 시간을 단축하였다.

격자 형상은 Fig. 3과 같으며, 격자는 Tetra 격자를 사용하였다. 정확한 해석 결과를 얻기 위해 패널과 수면 주위에 크기를 2 mm로 설정하였으며, 생성된 격자의 수는 Node 216,219개, Element 432,496개이다.

Fig. 2 2D model for flow analysis

Fig. 3 Mesh of flow analysis model

3.2 해석 결과

Fig. 4는 패널에 작용하는 압력에 대한 결과 이미지이며, 1번 패널의 앞면에서 약 1,177 Pa의 압력이 작용하는 것을 확인 할 수 있다. 풍하중은 수상태양광 패널의 앞면의 압력과 뒷면의 압력차로 계산하였으며, 각 패널에 대한 풍하중은 Fig. 5에서의 확인 할 수 있다. 가장 앞에 위치한 1번 패널에서 약 1,425 Pa의 풍하중이 작용하였으며, 이후 풍하중이 감소하는 경향을 보였다. 8번 패널부터 마지막에 위치한 30번 패널까지 약 140 Pa 정도의 비슷한 풍하중이 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 유동해석에서 얻은 풍하중 결과를 내향성해석과 구조해석의 하중 조건으로 사용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 4 Pressure distribution of analysis results

Fig. 5 Wind load distribution of floating photovoltaic solar panel

4. 내항성해석

4.1 해석 모델 및 경계 조건

해석 모델 및 경계 조건을 자동으로 생성 및 적용되도록 TCL script를 사용하였다. 명령어 입력을 통해 작업이 가능하며, 명령어는 Fig. 6과 같다. 명령어를 사용하여 모델의 형상뿐만 아니라 유닛의 기본 정보와 계류의 위치, 물성 및 정보, 각 유닛을 연결하는 조인트의 종류와 정보가 초기 설정값으로 자동 생성된다. 또한, 유동해석 결과 파일과 연동하여 각 패널의 풍하중값이 자동으로 외력으로 입력된다. 사용자가 직접 생성하는 모델은 실린더 형상의 해석 영역에 대한 모델만 생성하면 해석이 가능하다.

파랑조건은 불규칙파인 Jonswap spectrum을 사용하였으며, 최대파고 1 m, 파주기 15초로 설정하여 해석을 수행하였다. 각 유닛에 대해 무게중심과 선회 반경에 대한 값을 입력해주었으며, 유동해석으로 얻은 패널의 풍하중을 외력으로 입력하였다. 조류는 유속 0.5 m/s를 설정하여 해석을 수행하였다. 또한 유닛 간 연결부인 조인트는 Ball joint를 사용하여 6-자유도에 대해 모두 자유로운 조건을 적용하였으며, 계류의 경우 2단 교차 계류를 사용하였다. 이때 사용한 계류의 종류는 Catenary를 사용하였으며, 길이는 15 m, 계류 라인의 두께는 24 mm로

설정하여 해석을 수행하였다.

격자는 해석 영역인 실린더 형상에 대해 격자를 생성하였으며, 이때 생성된 격자의 수는 Node 3,597개, Element 17,659개이다. Fig. 7은 해석에 사용된 전체 모듈에 대한 형상과 격자 형상을 나타낸다.

Fig. 6 TCL script execution in Tdyn command line

Fig. 7 Wave analysis model and mesh

4.2 해석 결과

Figs. 8 ~ 10은 내향성 해석 결과를 나타내며, Fig. 10에서 계류에 대한 장력은 최대 약 21 kN이 작용하는 것을 확인 할 수 있다. 최대 장력은 가장 앞에 위치한 계류에서 작용하였으며, 측면에 위치한 계류에서는 장력이 거의 작용하지 않았다. Fig. 8은 측면에서의 해석 결과이며, 가장 앞에 위치한 유닛이 수면 아래로 가라앉는 결과를 확인할 수 있다. 이는 풍하중인 45 m/s의 풍속이 지속적으로 작용하고 있어서 이러한 결과를 나타내는 것으로 판단되며, 실제로 45 m/s의 풍속이 지속적으로 수상태양광 발전 설비에 작용하면 가장 앞에 있는 유닛이 수면 아래로 가라앉을 가능성이 있다. 이러한 현상을 해결하기 위해 가장 앞에 위치한 유닛에 기존 부유체 외에 보조 부유체를 설치하거나 계류를 보강하여 이러한 현상을 방지할 수 있을 것이라 판단된다. Fig. 9는 파의 분포와 파고에 대한 결과를 확인 할 수 있다.

Fig. 8 Position of unit by mooring

Fig. 9 Analysis result for total elevation

Fig. 10 Analysis result for mooring tension

5. 구조해석

5.1 해석 모델 및 경계 조건

구조해석은 풍하중과 파랑하중을 가장 크게 받는 1열에 위치한 유닛에 대해 해석을 수행하였다. Tdyn 프로그램의 구조해석 툴에는 일반적인 구조해석 툴에서는 제공되지 않는 파랑에 대한 정보를 입력하여 해석을 수행할 수 있으며, 내향성 해석과 같은 파랑 및 조류조건을 사용하였다. 또한 유동해석에서 얻은 풍하중을 적용하였으며, 조인트가 설치되는 위치에 대칭 구속조건을 입력하였으며, X축 방향은 종방향 구속, Y축 방향은 횡방향을 구속하였다. 마지막으로 하중을 가장 크게 받는 1열의 경우 계류가 설치되어 있으므로 계류의 복원 효과를 고려하기 위해 계류 설치 위치에 탄성 구속 조건을 사용하여 계류에 대한 조건을 적용하였다. Table 1은 해석에 사용된 재료의 물성을 나타내며, 구조해석에 사용된 격자의 형상은 Fig. 11과 같다. 생성된 격자의 수는 Node 41,996개, Element 83,584개이다.

Table 1 Properties of structural analysis materials

	Yield strength (MPa)	Poisson's ratio
Panel, Beam (Steel)	250.00	0.3
Floating body (FRP)	201.29	0.25

Fig. 11 Mesh of structural analysis model

5.2 해석 결과

Figs. 12와 13은 각각 빔 구조물의 변형과 응력을 나타낸다. 빔의 최대 변형은 최대 0.067 mm였으며, 패널을 받치는 빔에서 최대 141 MPa의 최대 응력이 발생하는 것을 확인하였다. 재료의 허용응력이 250 MPa이므로 안전계수가 1.77이므로 본 연구에서 사용한 모델의 경우 구조적으로 안전하다는 결과를 얻었다.

Fig. 12 Analysis result for displacement

Fig. 13 Analysis results for equivalent stress

6. 결론

본 연구에서는 2 MW급 수상태양광 발전 설비의 해석을 통해 구조적 안전성을 검토하였다. 해석은 유동해석, 내항성해석, 구조해석으로 총 3가지의 해석을 수행하였다.

유동해석은 패널에 작용하는 풍하중을 계산하기 위해 수행하였으며, 가장 앞에 위치한 1번 패널에서 약 1425

Pa의 풍하중이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이후 풍하중이 점점 감소하였으며 8번 패널부터 마지막인 30번 패널까지 거의 동일한 약 140 Pa의 풍하중이 작용하였다.

내향성해석의 경우, 앞선 유동해석의 결과인 풍하중을 외력으로 입력하여 파랑과 조류에 대한 해석을 수행하였다. 계류에 작용하는 장력은 1열에 연결되어 있는 계류에서 약 21 kN의 장력이 발생하였으며, 측면에 있는 계류에는 장력이 거의 작용하지 않는 것을 확인하였다. 또한 45 m/s의 바람이 지속적으로 작용할 경우 1열에 위치한 유닛이 수면 아래로 잠수되는 현상이 나타나는데 이러한 현상을 보조 부유체를 추가하거나 계류를 보강하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

구조해석은 유동해석과 내향성해석으로 얻은 하중을 사용하여 해석을 수행하였으며, 가장 큰 하중이 작용하는 1열의 유닛에 대해 해석을 수행하였다. 해석결과 구조물인 빔에서 발생하는 최대 응력은 141 MPa이었으며, 재료의 허용응력이 250 MPa이므로 구조적으로 안전하다는 결과를 얻었다.

REFERENCES

1. Jeong, K. Y. and Kim, S. Y., Stress Analysis of 100 kW Photovoltaic Plant Supporting Structure Considering Wind Load, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 37, No. 7, pp. 493-501, 2020.
2. Choi, J. W., Seo, S. H., Joo, H. J., and Yoon, S. J., Structural Performance Evaluation of Floating PV Power Generation Structure System, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 34, No. 5, pp. 1353-1362, 2014.
3. Kim, Y. W. and Kim, W. H., Stress Analysis on a Structure of Solar Tracker Subjected to Wind Load, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21, No. 5, pp. 747-754, 2012.
4. Kim, S. H., Baek, S. C., Choi, K. B., and Park, S. J., Design and Installation of 500-kW Floating Photovoltaic Structures Using High-Durability Steel, Energies, Vol. 13, No. 19, 4996, 2020.
5. Choi, H., Joo, H. J., Nam, J. H., and Yoon, S. H., Development of the Floating Type Photovoltaic Energy Generation System, Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 1, No. 1, pp. 16-26, 2010.
6. Kim, H. G., Kang, Y. H., and Jeon, W. H., Wind Load Analysis of the Heliostat Field in Northern Daegu for Concentrating Solar Power, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 40, No. 6, pp. 35-41, 2020.