북대구 집광형 태양열 발전소 헬리오스탯 필드의 풍하중 분석

김현구* · 강용혁** · 전완호**

*한국에너지기술연구원 신재생에너지자원지도연구실, 책임연구원

**한국엠에스씨소프트웨어, 상무이사, 공학박사

Wind Load Analysis of the Heliostat Field in Northern Daegu for Concentrating Solar Power

Kim Hyun-Goo* · Kang Yong-Heack** · Jeon Wan-Ho**

*Principal Researcher, New & Renewable Energy Resource Map Lab., Korea Institute of Energy Research

**Ph.D., MSC Software Korea, Director

[†]Corresponding author: yhkang@kier.re.kr

Abstract

The concentration performance of a heliostat field consisting of hundreds to thousands of reflectors allows for a deformation-based focus deviation of only 3 mrad or less. The most problematic aspect is the wind load; hence, in this study, the extreme wind speed condition was analyzed. Preceding studies such as field experiments, wind tunnel tests, or Reynolds-averaged Navier – Stokes (RANS) simulations were limited to a single heliostat or a single row, such that the characteristics of vortex shedding from the heliostat field could not be practically understood. In this study, the wind flow over the heliostat field in northern Daegu for Concentrating Solar Power (CSP), consisting of 450 reflectors, was analyzed using large eddy simulations with 33 million cells, in order to identify the characteristics of vortex shedding. In the heliostat field, the windward front and the left and right sides received the peak wind load, and the characteristics of vortex shedding were different depending on the position in the field. A fast Fourier transform analysis of the time-series wind pressure confirmed that the vortex shedding frequency ranged from 0.09 to 0.32 s⁻¹; it was determined that the vortex shedding from the upper and lower sides dominated that of the left and right sides of the heliostat. After predicting the wind load by Large Eddy Simulations (LES), structural analysis was performed to calculate the maximum displacement of the reflector. It was confirmed that the maximum displacement angle of the heliostat at the windward front, which receives the largest wind load at extreme wind events, satisfies the performance requirement of 1 mrad or less.

Keywords: 집광형 태양열 발전(CSP; Concentrated Solar Power), 헬리오스탯 필드(Heliostat Field), 풍하중(Wind load), 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics), 대와류모사(LES; Large Eddy Simulations), 와류흔림(Vortex shedding)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.6, pp.35-41, December 2020
<https://doi.org/10.7836/kjes.2020.40.6.035>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 23 September 2020

Accepted: 09 November 2020

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. 서론

태양광을 고배율로 집광하여 얻어진 고온 열에너지를 저장하여 상시 발전을 할 수 있는 집광형태양열발전(CSP)은 직달일사량이 풍부한 사막지역을 중심으로 꾸준히 보급되고 있다. REN21에 의하면 전세계 CSP 설치용량이 2018년말 5.6 GW에서 2019년말 6.2 GW로 11%가 증가하였으며, 국제에너지기구(IEA) 산하 SolarPACES (Solar Power and Chemical Energy Systems)에 의하면 2025년에는 전세계 CSP 설치용량이 10 ~ 22 GW에 이를 것으로 전망된다.

CSP는 태양의 복사에너지를 집광하는 헬리오스탯 필드와 고온의 태양열을 열매체에 흡수시켜 저장하거나 발전하는 파워블록으로 구성된다. 1,000°C 이상의 고온을 얻기 위하여 태양광을 반사시켜 집광하는 헬리오스탯이 수백 개에서 수천 개가 필요하다. 헬리오스탯은 시시각각으로 변하는 태양의 경로를 추적하여 반사판을 움직이면서도 각도 오차는 3 mrad 이하로 유지되어야 하므로, 풍하중(wind load)에 의한 정적, 동적 변형은 극복해야 할 최대의 기술과제이다¹⁾. 헬리오스탯에 가해지는 풍하중에 대한 선행연구는 실측자료를 이용한 동적 풍하중 연구, 축소모형을 이용한 풍동실험, 수치해석²⁾ 등으로 구분되나, 대부분이 단일 헬리오스탯 또는 단일 열(raw)에 대해서 수행되었다³⁾. 유동해석도 유동박리에 의한 동적풍압 해석에 적합한 LES (Large Eddy Simulation) 보다 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)가 주로 사용되었다. 게다가 헬리오스탯 필드에 대한 풍동실험이나 수치해석은 전무하다¹⁾.

본 연구에서는 유동박리를 포함한 비정상 유동해석에 적합한 LES로 헬리오스탯 필드를 수치해석하고 필드 위치별 블록에서의 풍하중 특성을 분석하였다. 또한 극한풍속 조건 하에서 풍하중에 의한 헬리오스탯의 변형을 구조해석하였다. 해석대상은 실제적 분석을 위해 북대구 CSP 발전소로 선정하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 북대구 헬리오스탯 필드

북대구 CSP (35.91°N, 128.58°E)는 북대구 인터체인지 하수부지에 위치하고 있으며 2 m × 2 m 크기 반사판의 헬리오스탯 450개가 태양을 추적하여 45 m 높이의 타워 상부에 태양열을 집광함으로써 200 kW의 발전 용량으로 전력을 생산한다. Fig. 1은 (a) 북대구 CSP 위성사진과 (b) 수치해석을 위한 3차원 솔리드 모델링(solid modeling)을 보여준다. 헬리오스탯 필드는 북풍인 경우를 기준으로 풍상부(A; 72개), 좌측부(B; 10개), 우측부(C; 10개), 풍하부(D; 50개) 클러스터를 4개 군집으로 구분하여 각각에 대한 유동특성을 고찰하였다. Fig. 1(c)에는 원으로 해당 클러스터의 특성 분석을 위해서 선택된 대표 헬리오스탯을 표시하였다.

헬리오스탯은 반사부, 구동부, 고정부로 구성되며, 반사부 전면에는 오목거울을 붙여 집광비를 높이며 고정부는 반사부를 지면에 고정시킨다. 구동부는 반사부를 백래시(backlash)가 없는 1단 워엄감속기와 파워실린더로 구동하여 태양을 추적한다. 북대구 CSP 헬리오스탯 필드에 입사되는 태양광을 타워로 집광하는 추적범위는

남향 기준으로 방위각(azimuth angle) $\pm 50^\circ$, 반사판 경사각(slope angle) $10^\circ \sim 70^\circ$ 이다. 본 연구는 이러한 추적범위를 고려하여 헬리오스탯 필드를 남향, 경사각 45° 로 가정하고 유동 및 구조해석을 수행하였다.

Fig. 1 Northern daegu concentrating solar thermal power plant

2.2 북대구 극한풍속 조건

헬리오스탯 필드의 풍환경 파악을 위해 제3세대 재해석자료 중 우리나라에 가장 적합하다고 평가된⁴⁾ MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2)의 풍속자료를 분석하였다. 지난 37년간 연간 최대풍속의 검벨(Gumbel) 확률분포로부터 50년 회귀 극한풍속(extreme wind speed)을 추정하였다. 북대구는 태풍의 직접적 영향권에 들지 않는 내륙이므로 지상 50 m 높이에서 최대풍속 30 m/s로 추정되었다.

2.3 유동해석 방법

헬리오스탯 필드의 난류유동은 SC/Tetra v12를 이용하여 LES 수치해석하였다. 참고로 선행연구에서 SC/Tetra를 이용하여 단일 헬리오스탯을 RANS 해석하였으며²⁾ 헬리오스탯과 유사한 형상과 크기의 태양광 패널 주위 유동에 대한 LES 해석을 수행하고⁵⁾ 이를 실험 및 풍동실험 결과와 비교하여 수치해석의 타당성을 검증한 바 있다. Fig. 2는 계산영역으로, 폭은 헬리오스탯 폭의 3배인 500 m, 높이는 타워 높이의 10배인 500 m, 길이는 헬리오스탯 필드 길이의 12배인 1.72 km로 설정하여 헬리오스탯과 타워로부터 박리된 유동이 충분히 정상상태로 발달할 수 있는 풍하측 거리를 확보하였다. 지면에는 점착조건을, 양측면과 상부면은 압력조건을, 입구면은 대기경계층을, 출구면은 완전 발달조건을 부과하였다. 격자계는 헬리오스탯 필드를 4개의 층으로 덮어 3.3천만개의 프리즘 격자로 구성하였다.

Fig. 2 Configuration of the computational domain (left) and surface mesh on a heliostat (right)

2.4 구조해석 방법

헬리오스탯 표면에 가해진 풍하중에 의해 발생하는 구조적인 변형을 수치해석하기 위해 상용소프트웨어인 SC/Tetra의 구조해석 모듈을 사용하였다. 즉, 헬리오스탯을 약 25,000개의 유한요소로 표면을 구성하고(Fig. 2 우측) 유동해석 모듈로부터 헬리오스탯 표면에 작용하는 압력을 계산한 후 이를 구조해석 모듈에 입력하여 구조적인 변형을 해석하였다. 참고로 북대구 CSP 발전소 헬리오스탯은 반사부는 재질이 알리미늄, 고정부는 SS400으로 전체 중량이 약 150 kg이며, 최대풍속 44 m/s일 때 풍하중이 560 kg일 것으로 추정하여 600 kg의 지면압력을 견딜 수 있도록 구조설계되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 유동해석 결과

북대구 CSP 헬리오스탯 필드의 LES 유동해석결과를 Fig. 3에 도시하였다. 풍상부로부터 바람이 헬리오스탯 필드 내부로 침투하면서 풍속이 급격하게 약화되며, 헬리오스탯 사이로 바람이 빠져나가며 반사판 모서리에서 유동박리가 발생하여 후류영역(wake zone)이 생성되는 형태가 관찰된다. 평균풍속(5 m/s)인 경우와 극한풍속(30 m/s)인 경우를 보면, 평균풍속인 경우에는 개별 헬리오스탯으로부터 발달되는 후류(wake)의 구조들이

Fig. 3 Wind speed distribution over the heliostat field (left) and through the heliostat array (right)

상세하게 보이는 반면, 극한풍속의 경우에는 유동박리가 풍하측으로 빠르게 전달됨에 따라 헬리오스탯 필드의 전체적인 패턴이 나타난다.

3.2 유동박리 영향

본 연구에서는 헬리오스탯 클러스터별로 동적 풍하중을 분석하였다. 즉, 풍압의 동적 변동성을 정량적으로 분석하기 위해 시간 영역에서의 풍압을 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform)하여 주파수 영역으로 변환하였다. Fig. 4는 후방열인 클러스터 A의 분석결과로, 주파수 영역에서 나타나는 탁월한 제1주파수는 0.09 Hz로 나타났다. 와도 분포에서도 보이듯이 가장 후방에 위치하고 있기 때문에 풍상부 헬리오스탯에 의해 약화된 풍속이 영향을 미치며, 이로 인하여 유동박리의 규모가 작아져서 유동박리 주파수도 빨라지는 것으로 풀이된다. 만일 헬리오스탯 반사판의 고유진동수가 유동박리에 의한 풍압 변동의 주파수와 일치할 경우, 공진(resonance)으로 인한 구조적인 취약성과 초점 상실에 의한 성능저하로 이어지게 된다.

(a) Surface pressure fluctuation on the heliostat

(b) Fast Fourier Transformation of pressure

(c) Vorticity distribution

Fig. 4 Temporal analysis on the surface pressure in the heliostat cluster D

전방열 클러스터 A의 제1주파수는 0.317 Hz로 나타났다. 반사판 좌우 경계로부터 발생한 후류는 헬리오스탯 위치에 따라 비대칭적으로 발달한다. 즉, 반사판의 변위는 상하 끝단과 좌우 끝단에서 발생하는 유동박리의 비대칭적 특성에 의해 상하좌우로 비대칭적 풍하중이 작용한다. 주풍향 방향의 좌우 대칭인 클러스터 B와 C는 클러스터 A와 상이한 변동성을 보인다. 즉, 제1주파수가 각각 0.136 Hz와 0.227 Hz로 대칭적 위치임에도 불구하고

하고 유동박리 주파수에 큰 차이가 있다. 이는 풍하측 타워와 발전소 건물의 차폐영향으로 헬리오스탯 필드의 유동장이 대칭이 아니기 때문인 것으로 풀이된다. 클러스터 C와 D의 풍압 간의 상관계수도 0.08로 아무런 상관성이 나타나지 않았다.

클러스터별 동적 풍압특성의 비교를 위해 제1주파수와 유동박리 특성을 나타내는 스트로울 수(St, Strouhal number)를 산정하여 Table 1에 제시하였다. 참고로 반사판이 45° 기울어졌으므로 접수면적에 해당하는 수력 직경은 1.66 m이다. 클러스터별 동적 풍압특성을 분석한 Table 1을 보면, St-Re 경험식으로부터 클러스터별 헬리오스탯에 입사되는 풍속 기준으로 환산된 St는 약 0.198이며, 이는 거친 표면의 실린더에서 전형적인 와류 흘림이 발생하는 유동영역에 해당한다.

Table 1 Strouhal number and Reynolds number of the separation flow through the heliostat clusters

Flow characteristics	Cluster A	Cluster B	Cluster C	Cluster D
Wind speed (m/s)	2.75	1.23	2.30	1.32
Reynolds number	3.0×10^5	1.3×10^5	2.5×10^5	1.4×10^5
Strouhal number	0.198	0.198	0.198	0.198
1 st frequency from FFT (s ⁻¹)	0.317	0.136	0.227	0.091
Theoretical frequency (s ⁻¹)	0.328	0.146	0.275	0.157
Frequency difference	3.2%	7.0%	17.4%	42.6%

3.3 구조해석 결과

극한풍속 조건에서 헬리오스탯 필드의 풍하중을 도시한 Fig. 5을 보면, 풍상부인 클러스터 A의 풍하중이 가장 크며 필드 내에서도 유동의 비대칭성에 의해 상이한 풍하중 분포가 나타난다. 최대 풍하중이 가해진 조건에서 반사판의 변형을 정적 구조해석한 결과에 의하면, 끝단에서 최대변형이 1 mrad 이하로 산정되었다. 유동박리에 의한 흘림와류의 진동으로 인한 동적 구조해석은 추후 수행되어야 할 것으로 생각된다.

Fig. 5 Wind loads over the heliostat field (left) and the deformation of the heliostat at Cluster A (right)

4. 결론

본 연구는 북대구 CSP 발전소의 헬리오스탯 필드에서 극한하중 조건시 와류흐림 유동장을 LES로 해석하여 풍하중을 산정한 후 구조해석을 수행하여 반사판의 변형을 계산하는 해석체계를 확립하였다. 주요 결론으로, 입사풍 조건에 따라 헬리오스탯 필드의 와류흐림이 비대칭적이며 풍하중이 풍상부와 좌우 측면에 집중됨을 확인하였다. 또한 반사판의 좌우보다 상하로의 와류흐림이 진동을 유발하며, LES로부터 단일 헬리오스탯이 아니라 헬리오스탯 필드 전체에 대한 정확한 와류흐림 주파수를 예측함으로써 공진을 회피한 구조설계에 필요한 핵심적인 자료를 제공할 수 있게 되었다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(C0-2407)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

REFERENCES

1. Bendjebbas, H., Abdellah-ElHadj, A., and Abbas, M., Full-scale, Wind Tunnel and CFD Analysis Methods of Wind Loads on Heliostats: A Review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 452-472, 2016.
2. Kim, H.-G., Jeon, W.-H., Kim, H.-N., and Kang, Y.-H., Wind Load and Structural Analysis on a Heliostat of the Tower-type Concentrating Solar Power, *J. of the Wind Eng. Institute of Korea*, Vol. 24, No. 3, pp. 1-8, 2020.
3. Yu, J.S., Emes, M.J., Ghanadi, F., Arjomandi, M., and Kelso, R., Experimental Investigation of Peak Wind Loads on Tandem Heliostats within an Atmospheric Boundary Layer, *Solar Energy*, Vol. 183, pp. 248-259, 2019.
4. Kim, H.-G., Kim, J.-Y., and Kang, Y.-H., Comparative Evaluation of the Third-Generation Reanalysis Data for Wind Resource Assessment of the Southwestern Offshore in South Korea, *Atmosphere*, Vol. 9, No. 73, 2018.
5. Jeon, W.-H., Lee, K.-K., Lim, T.-G., Kang, Y.-H., and Kim, H.-G., Large Eddy Simulation of Wind Flow around Solar Panels, *J. of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 20, No. 4, pp. 187-193, 2016.