바람에 기인하는 태양광추적구조물의 안정성 해석

김용우*, 이승열⁺

(Manuscript received: Sep, 27, 2012 / Revised: Jan, 9, 2013 / Accepted: Jan, 20, 2013)

Stability Analysis on Solar Tracker Due to Wind

Yong-Woo Kim*, Seoung Yeal Lee⁺

Abstract

A solar power generator is usually installed outdoors and it is exposed to extreme environments such as heavy fall of snow and high speed wind. Therefore, the solar tracker structure should be designed to have sufficient static and dynamic stiffness against such environmental conditions.

In this paper, eigenvalue analysis of the solar tracker is carried out by varying the pose of the solar panel and unsteady flow analysis around a single tracker or multi-trackers arranged in a line is performed by varying the parameters such as wind directions, wind speeds and the pose of the solar panel to evaluate whether there exists an instability of resonance due to vortex shedding. Finite element eigenvalue analysis shows that natural frequencies and modes are almost not influenced by the pose of the solar panel and the finite element flow analysis shows that there does not exist periodic vortex shedding due to the flow around single tracker or multiple solar trackers in a line.

Key Words : Solar tracker(태양광 추적장치), Wind(바람), Finite element analysis(유한요소해석), Vortex shedding(와류 방출), Natural frequency(고유진동수), Natural mode(고유진동형), Resonance(공진), Pose angle(자세 각도)

1. 서론

태양광 발전기^(1,2)는 실외에 설치되므로 자연 환경에 그대로 노출된다. 따라서 태풍과 같은 극단적인 풍하중이나 적설(snow fall)에 따른 외력에 대해 견딜 수 있도록 충분한 정적 강성이 확보되어야 한다. 또한 바람에 의한 태양광 추적장치 구조물 주위의 유동에 의한 와류방출 주파수가 태양광 추적장치 구조물의 고유주파수와 일치하거나 거의 비슷한 경우, 구조물에 공진을 일으켜 태양광 추적 정밀도가 현저히 감소할 수

있을 뿐만 아니라 구조물의 안정성에도 영향을 미칠 수 있으므로 동적 안정성에 대한 검토가 필요하다⁽³⁾.

극단적인 풍하중을 받는 경우의 태양광추적장치 구조물의 안전성을 검토하기 위해, Kim 등⁽¹⁾은 태양광 추적 구조물이 바람에 의해 받는 풍하중을 계산하고, 이 풍하중(압력분포)을 구조물에 적용하여 변형 형상과 응력을 계산하여 구조물의 설계를 검토한 바 있다.

본 연구에서는 극단적인 풍하중을 받는 태양광 추적장치에 대한 동적 안정성에 대한 검토하고자한다. 바람이 구조물 주위

* 순천대학교 기계공학과

주소: 540-742 전남 순천시 중앙로 413, 순천대학교 공과대학 기계공학과

+ 순천대학교 대학원 기계공학과

✉ Corresponding Author E-mail: kyw@sunchon.ac.kr

로 불 때 공기 유동은 구조물 후방에 와류를 발생시킬 수 있으며, 경우에 따라서는 주기적인 와류 방출이 일어날 수 있다. 주기적인 와류 방출이 발생할 경우, 와류방출 주기가 구조물의 고유진동 주기와 같거나 비슷하면 공진이 일어난다. 충격적인 예로 1940년에 일어났던 Tacoma 해협에서의 현수교 붕괴 사고를 들 수 있다. 이 사고의 원인은 강풍에 의해 발생한 와류방출주기가 다리의 비틀림 고유진동 주기와 가까워 공진을 일으켰던 것으로 분석되고 있다⁽³⁾. 따라서 본 연구에서는 극단적인 풍하중을 받는 태양광 추적장치에 대한 동적 안정성에 대한 검토하기 위해, 첫째, 태양광 추적장치의 태양광 전지판의 경사각도 등에 따른 고유치 해석을 실시하여 고유진동수와 고유진동형을 구하고, 둘째 태풍과 같은 강풍의 풍향 및 풍속 그리고 태양전지판의 경사각도 등의 변화에 따른 태양광 추적장치 구조물 주위의 비정상유동 해석을 실시하여 와류방출이 발생하는지 여부를 살펴보고자 한다. 만약 와류방출이 발생할 경우, 와류방출의 주기를 계산하여 구조물의 고유진동수와 와류방출 주파수를 비교함으로써 구조물의 동적 안정성을 검토하고자 한다.

2. 유한요소 모델링

본 연구에서 다루는 태양광추적장치 구조물의 형상 및 풍향은 각각 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 이 구조물이 태풍과 같은 극단적인 바람에 노출되었을 때, 태양광 추적장치의 동적 안정성에 대한 검토를 위해 3차원 유한요소해석을 실시한다. 유한요소해석의 처리 순서는 Fig. 3에서 보인 바와 같다. 첫째, 구조물의 고유치해석을 통하여 구조물의 자세 각도(θ , Fig. 2참조)에 따른 고유진동수와 고유진동형을 계산하고, 둘째 비정상 유동해석을 통하여 풍향 및 풍속(V , Fig. 2 참조) 그리고 구조물의 자세 각도의 변화에 따른 와류형성과정을 검토하여 와류방출 주파수를 계산한다. 이 두 가지의 해석으로부터 얻은 구조물의 고유진동수와 와류방출 주파수를 비교 검토함으로써 태양광 추적장치의 동적 안정성에 대해 논의하고자 한다.

태양광 추적장치 구조물의 주요 치수는 Fig. 1과 같으며, 태양광 전지판 하나의 치수는 1.65m×0.99m(가로×세로)이고, 이러한 30개의 전지판이 5×6의 행렬로 배열되어 있다. 전지판 사이의 틈새는 모두 5cm이다.

태양광 추적장치 구조물은 기초에 고정시켰으며(경계조건), 부품과 부품간의 접합부에 대해서는 Fig. 4에 표시한 부품들에 대해 용접 연결, 핀 연결 등의 구속조건을 사용하여 모델링하였다. 그리고 특별한 표시가 없는 부품과 부품간의 연결은 모두 본드접촉 조건을 적용하였다. Fig. 4에서 원으로 표시한 부분은 핀으로, 사각형으로 표시한 부분은 용접으로 모델링 하였다. 태양광 전지판에서 실리콘 기판과 유리 및 알루미늄 프레임간

Fig. 1 Solar tracker

Fig. 2 Head wind and tailwind

Fig. 3 Procedure of FE analysis

Fig. 4 Connections of two case in solar tracker; The connections, denoted by circle(○), are modeled by pin connections and the welding joint, represented by rectangles are modeled by welding connections

의 연결도 모두 본드접촉 조건을 적용하였다.

구조물의 고유치 해석을 위해 구조물을 4절점 4면체 요소로 분할하였으며 이 때 사용한 요소 개수는 약 709,000개이며 이에 따른 절점 수는 약 1,159,000개이다.

본 연구에서는 전체좌표계로 Cartesian 직교좌표계를 택하여 유동해석을 위해 이 좌표계에 평행한 6면으로 구성된 8절점 직각 6면체 요소를 사용하였으며, cell의 배열이 물체의 경계면에서 세분되고 물체의 표면으로부터 먼 곳에서는 cell의 크기가 큰 구조로 배열(“partially unstructured”)되게 할 수 있는 카티전 그리드 시스템(Cartesian partially unstructured grid system)⁽⁴⁻⁶⁾을 사용하였다. 이 구조물의 정면 또는 배면을 향하여 지면에 평행하게 불어오는 바람(Fig. 3 참조)의 구조물 주위의 유동해석을 위하여, 실제의 3차원 형상을 모델로 작성하였다. 특히, 태양전지판 사이의 틈이 충분한 요소가 개재되어 정확히 유동

이 묘사되도록 모델을 세련시켰다. 본 연구에서 유동해석을 위해 사용한 셀의 개수는 약 3,238,000개이며, 이 중에서 부분 셀(partial cell)은 3,126,00개이고 유체 셀(fluid cell)은 112,000개이다.

유동해석을 위한 전체 계산영역⁽¹⁾은 (폭×길이×높이)=50m×200m×25m)의 직사각형으로, 계산영역 내에서 태양광 추적 장치의 위치는 길이방향의 중심선 상에 위치하고 있으며, 바람이 불어오는 입구 면으로부터 50m 떨어진 지면에 놓았다.

태양광 추적장치의 뼈대를 이루고 있는 프레임의 재료는 일반구조용강(SSC400)으로서 이것의 주요 기계적 물성치와, 그리고 태양광 전지판을 구성하는 알루미늄 합금, 유리 및 실리콘의 물성치는 Table 1과 같다.

3. 해석 결과 및 검토

3.1 구조물 자세에 따른 고유치 해석

태양광 발전기의 태양광 전지판의 각도 변화($\theta=45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$)에 따른 6가지 자세의 각각에 대해 고유치 해석을 실시하였다.

Fig. 5는 각각의 자세 각도(θ)에 따른 고유진동수가 작은 것부터 배열한 크기 순(모드 번호)으로 각 고유진동수를 비교한 그래프이다. Fig. 5를 보면 태양광추적 구조물의 자세각도(θ)에 상관없이 거의 같은 크기의 고유진동수를 갖게 됨을 확인할 수 있다. 그러나 고유진동형을 조사해 보면 거의 근사한 고유진동수에서 자세 각도에 따라 고유진동형이 다른 경우도 있다. 그러나 거시적으로 살펴보면 고유진동수에 따른 고유진동형이 다를 뿐이고, 각 자세 각도별로 포함하고 있는 고유진동형들은

Fig. 5 Natural frequencies [Hz] versus mode numbers

Table 1 Mechanical properties of SSC400, aluminium alloy, glass and silicon

	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Mass Density (kg/m ³)	Yield Strength (MPa)
SSC400	205.94	0.3	7850	245
Aluminium Alloy	69.0	0.33	2700	27.57
Glass	68.935	0.23	2457.6	-
Silicon	112.4	0.28	2330	120

Fig. 6 Mode shapes of solar tracker when $\theta=45^\circ$

Table 2 Comparison of mode shapes of solar tracker with different pose angles by means of the mode number in the case of $\theta=45^\circ$

	The mode number of $\theta=45^\circ$														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\theta=50^\circ$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\theta=55^\circ$	1	2	3	4	5	6	8	7	9	10	11	12	13	14	15
$\theta=60^\circ$	1	2	3	4	5	8*	8*	7	9	10	11	12	13	14	15
$\theta=65^\circ$	1	2	3	4	5	8	6	7	9	10	11	12	13	14	15
$\theta=70^\circ$	1	2	3	4	5	8	6	7	9	10	11	12	13	14	15
	The mode number of $\theta=45^\circ$														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\theta=50^\circ$	16	17	18	19	21	20	23	22	24	25	26	27	28	29	30
$\theta=55^\circ$	16	17	21	18	19	20	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\theta=60^\circ$	16	21	17	18	19	20	22	23	24	26	25	27	28	29	30
$\theta=65^\circ$	16	21	17	18	19	20	22	23	24	26	25	27	28	29	30
$\theta=70^\circ$	16	21	17	18	19	20	23	22	24	26	25	27	28	29	30

*These modes are two distinct modes but are similar to the mode 8 of $\theta=45^\circ$.

Fig. 7 The mode shapes of the 6th, the 7th, and the 8th modes of solar tracker with different pose angles

거의 동일하다. 다시 말하면, 즉, 구조물의 자세각도에 상관없이 각각의 자세 각도별로 모두 근사한 고유진동형이 나타난다. 다만, 자세각도가 변함에 따라 일부의 고유진동형에 대한 고유진동수가 뒤바뀌어 나타남을 알 수 있다.

이에 대해 설명하기 위해, Fig. 6에 $\theta=45^\circ$ 일 때의 고유진동수의 오름차수 순으로 모드 번호를 정의하고 30개의 고유진동형을 도시하였다. 그리고 $\theta=45^\circ$ 의 모드 번호를 기준으로 $\theta=55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ 의 고유진동형과 비교, 검토하여 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 예를 들면, Table 2의 모드 번호들은 $\theta=45^\circ$ 의 것으로서, $\theta=45^\circ$ 의 모드번호 7, 8의 진동형은 $\theta=45^\circ$ 에서도 동일한 순서로 나타나는데 반해, $\theta=55^\circ$ 에서는 “7, 8”이 “8, 7”로 순서가 바뀌어 나타난다. 이러한 현상을 보이기 위해, 모드 번호 6, 7, 8번에 대한 고유진동형을 Fig. 7에 도시하였다.

Fig. 7을 보면 $\theta=60^\circ$ 를 제외하면 모드번호만 다를 뿐, 모두 동일한 고유진동형을 가지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 모드 번호 17~21 및 22~23 그리고 25~26에서도 나타나고 있다(Table 2 참조). 단, Fig. 7의 $\theta=60^\circ$ 의 경우 6, 7번 모드(Table 2에서 8*로 표시한 모드)는 $\theta=45^\circ$ 의 8번 모드가 분화한 것으로 생각되는 모드로서, 6 가지의 자세 각도 별로 각각 30개의 고유진동형을 조사하여 비교해 본 결과, 단 하나의 예외적인 경우였다.

위에서 검토한 바와 같이 동일한 태양광 추적구조물이 그 자세 각도가 변하여도, 자세 각도에 상관없이 대체로 근사한 고유진동수와 고유진동형을 갖는데, 자세 각도가 변함에 따라서 모

드번호가 뒤바뀌어 나타나는 것은 방향 별로 질량 및 강성의 분포가 변하게 되어 나타나는 현상으로 판단된다.

3.2 비정상 유동해석

바람이 구조물 주위로 불 때 공기 유동은 구조물 후방에 와류를 발생시킬 수 있으며, 경우에 따라서는 주기적인 와류 방출이 일어날 수 있다⁽⁷⁾. 주기적인 와류 방출이 발생할 경우, 와류방

Table 3 Test cases for flow analysis when the solar tracker is subjected to head wind

wind velocity	Angle, θ					
	45°	50°	55°	60°	65°	70°
30m/s	(F1)	(F2)	(F3)	(F4)	(F5)	(F6)
35m/s	(F7)	(F8)	(F9)	(F10)	(F11)	(F12)
50m/s	(F13)	(F14)	(F15)	(F16)	(F17)	(F18)
66.5m/s	(F19)	(F20)	(F21)	(F22)	(F23)	(F24)

Table 4 Test cases for flow analysis when the solar tracker is subjected to tailwind

wind velocity	Angle, θ					
	45°	50°	55°	60°	65°	70°
30m/s	(B1)	(B2)	(B3)	(B4)	(B5)	(B6)
35m/s	(B7)	(B8)	(B9)	(B10)	(B11)	(B12)
50m/s	(B13)	(B14)	(B15)	(B16)	(B17)	(B18)
66.5m/s	(B19)	(B20)	(B21)	(B22)	(B23)	(B24)

Fig. 8 Vector representation of flow over time t around a single solar tracker (Head wind, $V=66.5$ m/s, $\theta=70^\circ$)

Fig. 9 Vector representation of flow over time t around a single solar tracker (Tailwind, $V=66.5$ m/s, $\theta=70^\circ$)

Fig. 10 Vector representation of flow over time t around two solar trackers in a line (Head wind, $V=66.5$ m/s, $\theta=70^\circ$)

Fig. 11 Vector representation of flow over time t around two solar trackers in a line (Tailwind, $V=66.5$ m/s, $\theta=70^\circ$)

출 주기가 구조물의 고유진동 주기와 같거나 비슷하면 공진이 일어난다. 충격적인 예로 1940년에 일어났던 Tacoma 해협에서의 현수교 붕괴 사고를 들 수 있다. 이 사고의 원인은 강풍에 의해 발생한 와류방출주기가 다리의 비틀림 고유진동 주기와 가까워 공진을 일으켰던 것으로 분석되고 있다⁽³⁾.

태풍과 같은 극단적인 강풍이 불 때, 태양광 추적장치 구조물에서도 이러한 현상이 일어나는가에 대한 검토를 하기 위해, 풍향(정면풍 또는 배면풍), 풍속 및 태양광전지판의 자세 등에 따른 48 가지의 경우(Table 3 및 Table 4 참조)에 대하여 각각 비정상 유동해석을 실시하고, 와류방출 주파수와 구조물의 자

세에 따른 고유진동수를 비교 검토함으로써 바람의 영향에 의한 구조물의 동적 안정성을 검토하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는, 구조물의 자세 각도 $\theta=70^\circ$ 일 때 풍속 ($V=66.5\text{m/s}$)인 경우에 대해 비정상 유동해석 결과(계산영역의 중앙면에서의 유동장)를 1초 간격으로 벡터로 표시한 그림이다. Fig. 8은 정면풍에 대한 것이고 Fig. 9는 배면풍에 대한 것이다.

Fig. 8과 Fig. 9로부터 태양광 추적장치 구조물이 극단적인 강풍에 노출될 때 초기에는 와류(vortex)가 형성이 되고 곧이어 와류가 두 개로 분리되나(3초~4초), 시간이 경과됨에 따라

두 개의 와류가 합류되면서 구조물 후방으로 길게 자리를 잡게 됨을 알 수 있으며, 또한 주기적인 와류방출(vortex shedding)이 일어나지 않음을 알 수 있다. 이러한 유동 패턴(pattern)은 Table 3과 Table 4에 명시된 모든 경우에서도 유사한 유동 패턴을 보였다. 따라서, 구조물의 고유진동 주기가 와류방출 주기가 일치하거나 비슷한 값을 갖게 됨으로써 구조물에 공진을 일으키는 불안정 현상은 없을 것으로 판단된다.

또한, 2대 또는 3대의 태양광 추적장치 구조물이 연속하여 설치된 경우에 대해서도 비정상 유동해석을 실시하였다. Fig. 10(정면풍)과 Fig. 11(배면풍)은 연속하여 2대의 태양광 추적장치 구조물이 6m간격으로 설치하였을 경우의 유동해석 결과를 벡터로 도시한 것이다. 이 경우, 두 대의 구조물 사이와 두 번째 구조물의 후류 쪽에 각각 와류가 형성되나 와류 방출이 일어나지 아니하고 거시적으로 일정한 유동 패턴을 계속 유지함을 확인할 수 있다. 3대가 연속하여 한 줄로 설치된 경우에도 역시 일정한 유동 패턴을 유지하면서 와류방출이 일어나지 않음을 확인하였다.

4. 결론

바람이 구조물을 지나면서 일으키는 와류방출 주파수가 구조물의 고유진동수와 일치하거나 비슷한 경우 공진을 일으켜 태양광 추적 구조물의 안정성에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 불안정이 발생할 수 있는지 확인하기 위해서는 구조물의 고유진동수와 와류방출 주파수를 구하여 이들을 비교, 검토하여야 한다. 이를 위해, 풍향(정면풍 또는 배면풍), 풍속 및 구조물의 자세 등에 따른 비정상 유동해석을 실시하고, 구조물의 자세에 따른 고유치 해석을 실시하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 태양광 추적장치 구조물의 자세각도(θ)에 상관없이 각 자세 각도에서 나타나는 일련의 고유진동수 및 고유진동형은, 극히 예외적인 경우를 제외하면, 대체로 동일하거나 근사하다.
- (2) 태양광 추적장치 구조물이 극단적인 강풍에 노출될 때 초기에는 와류가 형성이 되어 와류가 두 개로 분리되나, 시간

이 경과됨에 따라 두 개의 와류가 합류되어 구조물 후방으로 길게 자리를 잡게 되면서 주기적인 와류방출이 일어나지 않음을 알 수 있다. 이러한 유동 패턴(pattern)은 본 연구에서 조사한 풍속, 풍향에 상관없이 유사한 경향을 보였다. 따라서, 구조물의 고유진동 주기가 와류방출 주기와 일치하거나 비슷하여 구조물에 공진을 일으키는 불안정 현상은 없을 것으로 판단된다.

References

- (1) Kim, Y. W., and Kim, W. B., 2012, "Stress Analysis on a Structure of Solar Tracker Subjected to Wind Load," *Journal of the KSMTE*, Vol. 21, No. 5, pp. 747~754.
- (2) Han, W. S., Kim, H. S., Choi, B. S., and Oh, D. K., 2007, "Trends of the Next-Generation Solar Cell Technology," *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 22, No. 5, pp. 86~94.
- (3) White, F. M., 2005, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Korea Inc.
- (4) Parry, J., and Tatchell, D., Flomerics' EFD Meshing Technology: A White Paper, <<http://www.revitcommunity.com>>.
- (5) Aftomis, M. J., Berger, M. J., and Melton, J. E., 1997, "Robust and Efficient Cartesian Mesh Generation for Component-Based Geometry," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 6, pp. 952~960.
- (6) Dawes, W. N., 2007, "Turbomachinery Computational Fluid Dynamics: Asymptotes and Paradigm Shifts," *Philosophical Transactions of Royal Society A*, Vol. 365, No. 1895, pp. 2553~2585.
- (7) Okamoto, S., Kagaya, H., Tanabe, A., and Kubota, N., 2007, "Flow Past an Inclined Flat Plate of Finite Width Placed on a Ground Plane," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 73, No. 725, pp. 94~102.