풍하중을 받는 태양광 추적 구조물의 응력해석

김용우*, 김원봉⁺

(Manuscript received: Nov, 2, 2011 / Revised: Mar, 19, 2012 / Accepted: Aug, 21, 2012)

Stress Analysis on a Structure of Solar Tracker Subjected to Wind Load

Yong-Woo Kim*, Won Bong Kim⁺

Abstract

A solar power generator is usually installed outdoors and it is exposed to extreme environments such as snow weight and wind loading. The solar tracker structure should be designed to have sufficient stiffness and strength against such loads.

In this paper, simulations are performed by varying the parameters such as wind directions, wind speeds and the pose of the solar panel to evaluate the effects of extreme wind on solar tracker. As the effects of wind load, maximum displacement and maximum equivalent stress in the solar tracker are calculated. Finite element stress analysis is carried out by using the pressure distribution that is obtained by prior wind load analysis due to the flow around the solar tracker. The stress analysis of solar tracker to check and/or improve structural robustness provides some useful instructions for structural design or revision of solar tracker.

Key Words : Solar tracker(태양광 추적장치), Wind load(풍하중), Finite element analysis(유한요소해석), Drag coefficient(항력계수), Maximum von mises stress(최대등가응력)

1. 서 론

집광 렌즈를 이용한 태양광 발전기⁽¹⁾의 솔라 트래커 판의 정적 및 동적 변형을 고려한 구조물의 설계는 태양광 발전의 고효율을 유지하는 데 매우 중요한 영향을 미친다. 이는 태양광에 대한 솔라 패널(solar panel)이 항상 수직을 유지할 수 있도록 태양을 추적하여야 하기 때문이다. 그러기 위해서는 트래커 구조물의 변형이 충분히 작아 트래커의 추적 정밀도의 허용범위 내에 들도록 구조물의 강성이 충분히 커야한다. 또한, 태양광 발전기는 실외에 설치되므로 자연 환경에 그대로 노출된다. 따라서 태풍과 같은 극단적인 풍하중(wind load)이나 적설(snow

fall)에 따른 외력을 받는다.

본 연구에서는 CPV 센서(concentrated photo voltage)를 사용하는 2축-태양광 추적장치 구조물이 순간최대풍속 66.5m/s의 태풍과 같은 극단적인 풍하중을 받을 때, 태양광 추적장치 구조물에 대한 응력해석을 실시하였다. 이를 위해 먼저, 유동해석을 통해 풍향(정면풍 및 배면풍), 풍속(설정기준 풍속 30m/s~66.5m/s) 및 추적장치 구조물상에 탑재되어 있는 태양전지판의 경사각도(45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°) 등이 변화함에 따른 태양광 추적장치 구조물이 받는 풍하중을 계산하였다. 두 번째로 이 풍하중(압력분포)을 태양광 추적장치에 작용시켜 구조해석을 실시하여 태양광 추적장치에 발생하는 최대변위 및 최대응력

* 순천대학교 기계공학과 (kyw@sunchon.ac.kr)

주소: 540-742 전남 순천시 중앙로 413

+ 순천대학교 대학원 기계공학과

을 계산하였다. 세 번째로 해석 결과, 강도의 문제가 있는 취약부에 대하여 치수 및 형상을 수정하고 다시 응력해석을 실시하는 반복과정을 거쳐 취약부를 보완하였다. 이러한 과정을 거쳐 얻은 결과들을 정리, 검토, 분석하여 태양광 추적장치 구조물의 설계에 도움이 되는 유용한 결과와 유의점들을 정리하였다.

Fig. 1 Solar Panel

Fig. 2 Procedure of FE analysis

2. 유한요소 모델링

본 연구의 대상 모델은 태양광 추적 구조물(Fig. 1 참조)로서, 이 구조물이 바람에 의해 받는 풍하중을 계산하고, 이 풍하중(압력분포)을 구조물에 적용하여 변형 형상과 응력을 계산하고자 한다. 이를 위한 3차원 유한요소해석의 처리 순서는, Fig. 2에서 보인 바와 같이, 유동해석을 통하여 계산한 압력분포를 구조물에 적용하여 응력 및 변형해석을 실시하였다.

유동해석을 위한 계산영역(폭×길이×높이=50m×200m×25m)은 Fig. 4와 같다. 그리고 계산영역 내에서 태양광 추적장치는 길이방향의 중심선 상에 위치하고 있으며⁽⁵⁾, 바람이 불어오는 입구 면으로부터 50m 떨어진 지면에 놓여있다.

태양광 추적장치의 뼈대를 이루고 있는 프레임의 재료는 일반구조용강(SSC400)으로서 이것의 주요 기계적 물성치는 Table 1과 같다.

3. 해석 결과 검토 및 보완

3.1 유동해석

태양광 발전기는 바람이 태양광 전지판의 정면 또는 후면을 향하여(바람방향에 수직인 면에 대해 태양광전지판의 투영면적이 가장 큰 방향을 향하여) 불어올 경우 가장 큰 항력을 받을 것으로 예상된다. 그러므로 정면풍(head wind)과 배면풍(tailwind)에 대한 항력을 계산하기 위하여, 태양광 전지판의 경사각도(θ), 풍속(V), 풍향(정면풍과 배면풍) 등에 대한 48가지 조합(Table 2와 Table 3 참조)에 대해 각각 유동해석을 실시하였다.

Fig. 3 Head wind and tailwind

Table 1 Mechanical properties of SSC400

Young's modulus	Poisson's ratio	Mass density	Yield Strength
205.94GPa	0.3	7850kg/m ³	245MPa

(a) Computational domain for head wind

(b) Computational domain for tailwind

Fig. 4 Computational domain for wind flow analysis

Table 2 Test cases for wind loading 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 3 Test cases for wind loading 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)

(1) 태양광 추적장치 주변의 속도장과 압력장

정면풍 및 배면풍을 받는 태양광 추적장치 주변의 전형적인 속도분포와 압력분포를 각각 Fig. 5(정면풍)와 Fig. 6(배면풍)에 도시하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 중앙면에서의 속도 및 압력 분포를 도시한 것으로, 바람을 맞는 면의 압력이 반대면의 압력보다 매우 높음을 보여준다.

(2) 풍향, 풍속, 경사각도에 따른 항력계수

Table 2와 Table 3의 조건에 따른 각 경우의 항력계수를 Fig. 7과 Fig. 8에 정리하였다. 항력계수(drag coefficient)는 다음과 같이 정의된다.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

(a) Velocity distribution

(b) Pressure distribution

Fig. 5 Simulation results when the solar tracker is subjected to head wind(35.0m/s, $\theta = 45^\circ$)

(a) Velocity distribution

(b) Pressure distribution

Fig. 6 Simulation results when the solar tracker is subjected to tailwind(35.0m/s, $\theta = 45^\circ$)

Fig. 7 Drag coefficients (C_D) for the test cases in Table 1 when the solar tracker is subjected to head wind

Fig. 8 Drag coefficients (C_D) for the test cases in Table 1 when the solar tracker is subjected to tailwind

여기서 F_D 는 유체유동방향(V 방향)으로 물체에 작용하는 항력이고, 면적 A 는 유체유동방향(V)에 수직한 평면에 투영한 물체의 면적이다. 그리고 ρ 는 공기의 밀도이다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 배면풍일 때의 항력계수의 범위는 1.0~1.2인데 반해, 정면풍일 때의 항력계수는 0.9~1.1이다. 이는 배면풍일 때 대체로 더 큰 항력이 작용됨을 의미한다.

3.2 구조해석

Table 2와 Table 3의 총 48가지의 경우에 대한 유동해석으로부터 얻은 압력분포를 경사각도가 다른 각각의 구조물에 적용하고 응력해석을 실시하여 최대변위($\delta_{\max}$)와 최대등가응력($\sigma_{\max}$, Von Mises stress)을 계산하였다.

(1) 풍향, 풍속, 경사각도에 따른 최대변위

풍향(정면풍과 배면풍)에 따른 일반적인 변형 형상은 각각 Fig. 9와 Fig. 10과 같다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 보는 바와 같이 최대변위는, 정면풍일 때 태양전지판의 아래쪽 양 귀퉁이에서 발생하며, 배면풍일 때 위쪽 양 귀퉁이에서 발생함을 알 수 있다.

Table 2(정면풍)에 요약된 풍속과 경사각도에 따른 최대변위를 Fig. 11에, 그리고 Table 3(배면풍)에 요약된 조건에 따른 최대변위를 Fig. 12에 정리하였다.

Fig. 11과 Fig. 12로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- 풍속이 증가함에 따라 최대변위가 증가한다.
- 동일 풍속일 때, 정면풍에 의한 최대등가응력이 배면풍에 비해 더 크다.

Fig. 9 Deformed configuration of solar tracker when solar tracker is subjected to head wind

Fig. 10 Deformed configuration of solar tracker when solar tracker is subjected to tail wind

Fig. 11 Maximum displacement (δ_{max}) for the test cases in Table 2 when the solar tracker is subjected to head wind

- 배면풍의 경우, 경사각도가 증가함에 따라 최대변위의 변화가 거의 없다.

(2) 풍향, 풍속, 경사각도에 따른 최대등가응력

Table 2(정면풍)에 요약된 조건에 따른 최대 등가응력을 Fig. 13에, 그리고 Table 3(배면풍)에 요약된 조건에 따른 최대 등가응력을 Fig. 14에 도시하였다.

Fig. 12 Maximum displacement (δ_{max}) for the test cases in Table 3 when the solar tracker is subjected to tail wind

Fig. 13 Maximum Von Mises stress (σ_{max}) for the test cases in Table 2 when the solar tracker is subjected to head wind

Fig. 14 Maximum Von Mises stress (σ_{max}) for the test cases in Table 3 when the solar tracker is subjected to tail wind

Fig. 13과 Fig. 14로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- 풍속이 증가함에 따라 최대응력도 증가한다.
- 동일 풍속일 때, 정면풍에 의한 최대등가응력이 배면풍의 최대등가응력에 비해 더 크다.
- 배면풍의 경우, 경사각도가 증가하여도 최대등가응력은 거의 변화가 없다.
- 최대변위는 정면풍일 때 태양 전지판의 아래쪽 양 귀퉁이에서 발생하며 배면풍일 때 위쪽 양 귀퉁이에 발생한다.

3.3 해석결과 및 검토

지금까지의 해석결과에서 특히 유의할 점들을 살펴보면 다음과 같다.

첫째 동일 풍속, 동일 자세에서, 배면풍을 받는 경우가 정면풍을 받는 경우보다 더 큰 풍하중을 받고 있음에도 불구하고, 정면풍일 때 더 큰 최대응력이 나타나고 있다는 점이다. 이는 구조물 자체가 배면풍에 비해 정면풍에 더 약하게 설계되어 있음을 의미한다.

(a) The location of maximum Von Mises stress ($\sigma_{\max}$) in case of head wind

(b) The location of maximum Von Mises stress ($\sigma_{\max}$) in case of tailwind

Fig. 15 The locations of the maximum Von Mises stress ($\sigma_{\max}$) in cases of head wind and tailwind

둘째 각 경우의 최대응력들이 모두 특정한 위치에서 나타나고 있으며 항복응력을 훨씬 초과하고 있으나, 최대응력이 발생하는 위치를 제외한 나머지 영역에서의 응력은 모두 항복응력보다 작게 나타나고 있다는 점이다(정면풍일 경우 0~95.3MPa, 배면풍일 경우 0~116.8MPa). 이러한 현상의 원인을 고찰하기 위해 최대응력이 나타나는 위치를 살펴보면, 정면풍의 경우 최대등가응력이 회전 힌지와 바로 연결된 상부프레임의 이음새부분(용접부)에서, 그리고 배면풍일 경우 액추에이터 연결지지부(힌지부)에서 최대응력이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 위치들은 Fig. 15에서 보는 바와 같이 모두 태양광 추적구조물이 태양광을 추적할 수 있도록 자세를 바꿀 때 사용하는 회전 힌지 또는 힌지와 바로 연결되는 부품 상에 존재하며, 이 부품들은 태양 전지판이 받는 모든 풍하중을 기둥을 통해 기초로 전달되는 하중전달 경로 상에 있는 부품들이다. 따라서 구조적으로 하중이 집중되는 부분이다. 또한 이 부품들의 기하학적 특성상 응력집중현상이 발생하기 때문에 매우 큰 응력이 나타나는 것으로 사료된다. 이러한 추론은, 최대응력들이 모두 특정한 위치에서 나타나고 있으며 항복응력을 훨씬 초과하고 있으나, 최대응력이 나타나는 점을 제외한 나머지 영역에서의 응력은 모두 항복응력보다 작게 나타나고 있다는 점과도 잘 부합된다.

따라서 태양광을 추적할 수 있도록 회전 힌지부를 채용하는 경우, 구조적으로 회전 힌지부가 모든 풍하중을 기둥에 전달하는 연결부⁽⁶⁾에 있게 마련이고, 회전 힌지부 및 힌지에 바로 연결되는 연결부에서 구조적으로 응력집중현상이 일어나는 부분이 되므로, 하중전달경로 상에 있는 취약 부품의 강도와 관련한 형상 및 치수에 대한 재검토가 필요한 것으로 판단된다.

3.4 취약 부품에 대한 재설계

3.3절의 해석결과 및 검토사항들을 바탕으로, 하중전달경로 상에 있는 취약 부품에 대한 보완을 위해 다음과 같은 관점 및 방법으로 재설계를 시도하였다. 첫째, 응력집중을 완화시키기 위해 용접부 필렛의 반경을 증가시키거나 연결지지부(힌지부)의 구멍과 핀의 직경을 증가시켜 부품의 형상을 조정한다. 둘째, 풍하중이 전달되는 경로 상에 있는 뼈대(프레임) 및 보강용 받침대(stiffener 및 bracket)의 두께 또는 길이를 증가시키거나 개수를 증가시켜 응력을 감소시킨다.

위와 같은 방법을 적용하기 위해, 정면풍에 대한 취약부의 수정과 배면풍에 대한 취약부 수정을 각각 구분하여 응력해석을 실시하였다. 이와 같이 두 경우를 분리하여 검토하는 것은 풍하중의 크기 및 방향이 다르기 때문이다. 두 경우의 수정 모델들에 대해, 각각 Fig. 2에서 보인 유한요소해석 순서와 같이 ‘(부품 수정 및 보완)→(응력해석)→(결과 검토 및 수정)→(부품 재수정 및 보완)’의 과정을

반복 실시하여 최대응력이 항복응력보다 작게 발생하도록 부품을 재설계하였다. 정면풍 및 배면풍을 받는 각각의 경우에 대해 독립적으로 재설정된 수정 사항들(총 17개 부품을 수정하였음)을 모두 태양광 추적장치 구조물에 반영하여 모델링한 다음, 66.5m/s의 정면풍 및 배면풍을 받는 12가지의 경우들(Table 2의 F19~F24 및 Table 3의 B19~B24)에 대하여 유동해석과 응력해석을 실시하였다.

수정한 구조물의 자세 각도에 따른 최대변위 및 최대응력을 수정전 구조물의 결과와 함께 Table 4~Table 7에 정리하였다. Table 4와 Table 5에 최대응력을 비교하였는데, 보는 바와 같이 각 경우의 최대응력들이 모두 항복응력보다 작게 나타나도록 취

Table 4 Maximum Von Mises stresses ($\sigma_{\max}$) before/after modifying weak parts when the solar tracker is subjected to head wind of 66.5m/s

unit: MPa

	Angle, θ					
	45°	50°	55°	60°	65°	70°
(A): Before modification	2132	2149	2165	2029	2064	1962
(B): After modification	211.8	198.4	187.7	177.4	169.5	172.3
(A) ÷ (B)	10.07	10.83	11.53	11.44	12.18	11.39

Table 5 Maximum Von Mises stresses ($\sigma_{\max}$) before/after modifying weak parts when the solar tracker is subjected to tailwind of 66.5m/s

unit: MPa

	Angle, θ					
	45°	50°	55°	60°	65°	70°
(A): Before modification	1622	1576	1513	1594	1478	1425
(B): After modification	215.6	211.7	216.8	225.3	223.2	227.8
(A) ÷ (B)	7.52	7.44	6.98	7.08	6.62	6.26

Table 6 Maximum displacements ($\delta_{\max}$) before/after modifying weak parts when the solar tracker is subjected to head wind of 66.5m/s

unit: mm

	Angle, θ					
	45°	50°	55°	60°	65°	70°
(A): Before modification	82.66	80.03	78.52	78.65	82.86	85.58
(B): After modification	55.68	54.21	53.52	52.35	50.42	54.37
(A) ÷ (B)	1.48	1.48	1.47	1.50	1.64	1.57

약부가 성공적으로 보완되었음을 확인할 수 있다. 수정후의 최대응력은 수정전과 비교하여, 정면풍의 경우 약 1/10~1/12배로

Table 7 Maximum displacements ($\delta_{\max}$) before/after modifying weak parts when the solar tracker is subjected to tailwind of 66.5m/s

unit: mm

	Angle, θ					
	45°	50°	55°	60°	65°	70°
(A): Before modification	130.8	126.9	126.5	122.8	123.8	120.4
(B): After modification	71.04	75.81	76.93	79.18	76.07	76.62
(A) ÷ (B)	1.84	1.67	1.64	1.55	1.63	1.57

(a) The location of maximum Von Mises stress ($\sigma_{\max}$) in case of head wind

(b) The locations of maximum Von Mises stress ($\sigma_{\max}$) in case of tailwind. The location is dependent on the angle(θ); A is the location of maximum stress when $\theta = 45^\circ$, B when $\theta = 50^\circ$, and C when $\theta = 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$

Fig. 16 The locations of the maximum Von Mises stress ($\sigma_{\max}$) in cases of head wind and tailwind when the wind speed is 66.5m/s

감소하였으며, 배면풍의 경우 약 1/6~1/7배로 감소하였음을 알 수 있다. 수정후에 최대응력이 발생하는 위치들을 보면 Fig. 16과 같다. Fig. 15에 표시한 수정전의 최대응력위치들과 비교해 볼 때 그 위치가 변한 것은, 응력집중을 완화시키기 위해 용접 부 필렛의 반경을 증가시키거나 연결지지부(힌지부)의 구멍과 핀의 직경을 증가시켜 부품의 형상을 조정했기 때문이며, 풍하중이 전달되는 경로 상에 있는 뼈대(프레임) 및 보강용 받침대(stiffener 및 bracket)의 두께 또는 길이를 증가시키거나 개수를 증가시켜 응력을 분산시켰기 때문이다.

또한, Table 6과 Table 7에 정리한 취약부품에 대한 재설계 전과 후의 최대변위를 비교해보면, 수정후의 최대변위는 수정전에 비해 정면풍의 경우 약 60~68% 수준으로 감소하였으며, 배면풍의 경우 약 54~64% 수준으로 감소하였음을 알 수 있다.

4. 결 론

순간최대풍속 66.5m/s의 극단적인 강풍을 받는 태양광 추적 장치 구조물에 발생하는 최대응력을 계산하기 위해 유동해석과 구조해석을 실시하여, 그 결과들을 정리하였다. 그리고 해석 결과, 강도에 문제가 있는 취약부품들에 대하여 치수 및 형상을 수정하고 다시 응력해석을 실시하는 반복과정을 통해 취약부를 보완하였다. 이러한 과정을 통하여 태양광 추적장치 구조물의 설계에 도움이 되는 유용한 결과 및 유의점을 정리하여 다음에 제시하였다.

- (1) 정면풍 또는 배면풍에 의한 풍하중은 풍속이 증가할수록 증가하며, 이에 따라 최대등가응력도 증가한다.
- (2) 배면풍일 때의 항력계수의 범위는 1.0~1.2인데 반해, 정면풍일 때의 항력계수는 0.9~1.1의 값으로, 배면풍일 때 대체로 더 큰 항력이 작용한다.
- (3) 최대등가응력이 발생하는 위치는 풍향(정면풍 또는 배면풍) 및 자세 각도에 따라서 다르게 나타나지만 모두 풍하중이 기둥에 전달되는 경로 상에 존재하는 부품들에서 나타난다.

- (4) 최대응력이 재료의 항복강도보다 커서 재설계하고자 할 때는, 하중전달경로 상에 있는 부품들을 우선 검토하여야 하며 이 부품들에 발생하는 응력집중이 완화되도록 그리고 충분한 강도를 확보하도록 형상 및 치수의 수정을 우선적으로 고려해야 한다.

후 기

본 연구는 호남광역경제권 선도산업육성사업의 지원으로 이루어짐.

References

- (1) 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.
- (2) Dassault Systems, S. A., *COSMOSFloWorks 2008: Fluid Simulation Analysis*, Oct. 2007.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Han, M. S. and Cho, J. U., 2011, "Structural Analysis of Excavator Arm and Its Connection Pins," *KSMTE*, Vol. 20, No. 1, pp. 7~12.