

접이식 태양광 발전 구조물의 풍하중해석

손창우, 김태균, 서태일*
인천대학교 기계공학과

Wind load analysis of Structure for Folding Solar Power System

Chang-Woo Son, Tae-Kyun Kim, Tae-Il Seo*

Division of Mechanical Engineering, Incheon National University

요약 본 접이식 태양광 발전 시스템은 독립형 시스템의 하나로, 태양광 패널이 부착되어 있는 구조물이다. 이를 지지하는 부분과 이동의 용이함을 위해 접히는 부분으로 구성되어 있다. 태양광 패널의 발전효율을 최대화 하여 전기를 생산하기 위해서는 태양광 패널의 효율도 중요하지만 가장 중요한 것은 구조물 안정성이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 접이식 태양광 발전 구조물은 격오지에서도 독립으로 전기를 생산할 수 있는 시스템으로 이동과 설치가 용이한 접이식 방식의 구조물이다. 이러한 구조물은 야외에 설치되므로 풍하중, 적설하중 등이 작용한다. 본 논문에서는 접이식 태양광 발전 구조물에 가장 영향이 큰 풍하중을 MeshFree 유한요소법을 사용하여 구하였다. 일반적으로 구조물의 형상은 복잡하고 큰 설계안 때문에 Mesh를 수행할 때 시간이 오래 걸린다는 단점을 가지고 있다. 이러한 기존 Mesh의 문제점을 해결하기 위해 최근 MeshFree가 개발되어 사용되고 있다. MeshFree는 기존 해석 시 요구되는 Mesh 작업을 간소화함으로써, 사용자가 보다 쉽게 해석 할 수 있는 프로그램이다. 또한, 사계절 남중고도에 따라 일반적으로 많이 설치되는 각도인 15°, 30°의 각도로 설계하여 해석하였다. 해석결과 풍하중은 지면과의 경사각이 클수록 커지는 것을 알 수 있었다. 또한, 풍하중실험을 통해 신뢰성을 확보하였다.

Abstract A folding solar power system is a stand-alone system and is a structure with solar panels attached. It consists of supporting parts and folding parts for ease of movement. While the efficiency of solar panels is also important to produce electricity by maximizing the power efficiency of solar panels, the most important thing is structure stability. The folding solar power structure intended to be developed in this study is a collapsible structure that is easy to move and install into systems that can produce electricity from grid to independent. Since these structures are installed outdoors, wind loads, snow cover, etc. In this paper, the wind loads most affected by the folding solar power generation structure were obtained using the MeshFree Finite Element Method. MeshFree is a program that makes it easier for users to interpret by simplifying the mesh tasks required by an existing analysis. The analysis showed that the greater the angle of inclination of the wind to the ground, the greater the wind load. In addition, reliability was ensured by wind load testing.

Keywords : Finite element method, Folding solar power system, Meshfree, Solar panels, Structure

1. 서론

1.1 신재생에너지의 필요성

현재 전 세계가 자원고갈에 따른 문제로 위기에 직면해 있다. 화석에너지의 고갈로 인해 친환경적인 에너지

에 대한 연구개발이 진행되고 있다. 국내에서는 신재생에너지 공급 의무제도가 시행되면서 신재생에너지의 중요성이 더욱 빛을 발하고 있다. 신재생에너지 공급의무화 제도란, 일정 규모 이상의 발전설비를 보유한 발전사업자에게 총 발전량의 일정량 이상을 신재생에너지로 생

본 연구는 산업기술융합지원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No.20173010013220)

*Corresponding Author : Tae-Il Seo (Incheon National Univ.)

Tel: +82-10-8769-8734 email: tiseo@inu.ac.kr

Received May 29, 2018

Revised July 3, 2018

Accepted August 3, 2018

Published August 31, 2018

산한 전력을 공급하도록 의무화한 제도로 신재생에너지 개발 이용, 보급 촉진법에 근거를 두고 있다.[1~4]

1.2 접이식 태양광 발전 시스템

태양광발전 시스템은 부하의 종류에 따라 독립형 시스템과 계통연계형 시스템으로 구분된다. 독립형 시스템은 외딴 섬과 같이 전기가 들어오지 않는 지역에서 태양광 발전으로만 전기를 공급하는 방식이며, 계통연계 시스템은 태양광 발전으로 얻은 전기와 전력회사에서 공급하는 전기를 함께 사용하는 시스템이다.

접이식 태양광 발전 시스템은 독립형 시스템에서 개발되는 태양광 발전 구조물의 하나이다. 격오지에서 하나의 태양광 발전 시스템만을 이용해서 자가 발전하기 위해 이동의 편리함, 설치의 용이성 등을 고려한 접이식 태양광 발전 시스템에 관한 연구가 개발되고 있는 추세이다.

1.3 구조물 안정성의 필요성

태양광 발전의 고효율을 유지하는데에는 많은 요소가 영향을 미친다. 그 중 가장 큰 영향을 미치는 요소중 하나는 태양광에 대한 솔라판넬(Solar panel)이 항상 수직을 유지할 수 있도록 설계된 구조물의 안정성이 가장 중요하다. 태양에너지를 이용한 시스템은 태양에너지 빛을 이용하기 때문에 정밀해야 하는데 구조적으로 안정하지 않으면 아무리 열효율이 높은 패널을 사용하더라도 전기 에너지를 생산하는데 문제점이 발생한다. 또한, 태양광 발전 시스템은 실외에 설치되므로 자연 환경에 그대로 노출되어 풍하중이나 적설에 따른 외력에 견딜 수 있도록 충분한 강도가 확보되어야 한다[5].

본 연구에서는 풍하중을 받는 접이식 태양광 발전시스템에 대한 역학적 검토 및 설계를 위해, 유동해석을 이용하여 풍향, 풍속, 구조물의 각도 등에 따른 접이식 태양광 발전 구조물이 받는 풍하중을 계산하였다. 또한 풍하중 실험을 통해 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하였다.

2. 접이식 태양광 발전 구조물 설계

2.1 구조 모델링

본 연구의 대상 모델을 접이식 태양광 발전 구조물로써, 이 구조물이 바람에 의해 받는 풍하중을 계산하고,

이 풍하중을 구조물에 적용하여 변형량과 응력을 계산하고자 한다. 이를 위해 우선 3차원 모델링 프로그램인 UG 10.0을 이용해서 모델링 하였다. 손쉽게 전개가 가능하며, 내부 적재 공간의 최적화를 통해 공간 배치를 활용할 수 있는 모델링을 수행하였으며, 구조물로부터 태양광 모듈을 지지하기 위한 방법으로는 가스스프링 방식을 이용하였다.

또한, 태양광 발전 구조물의 뼈대를 이루고 있는 프레임의 재료는 일반구조용강(SS400)으로 사용하였다.

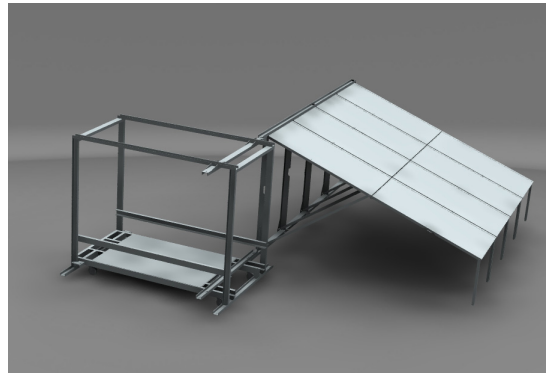


Fig. 1. 3D Modeling of Folding Solar Power System

2.2 설계 하중

본 연구에서 사용한 태양광 발전 시스템 구조물을 설계하기 위해 [건축구조기준] (국토해양부 고시 제 2009-1245호)를 기준으로 설계하중을 계산하였다.

풍하중의 계산은 강도 설계법을 적용하여 하중을 계산하며 소요강도를 사용하중에 하중계수를 곱하여 구하는 관계로 하중계수 설계법이라고도 한다.

Table 1. Constant to be considered calculating wind loads

| | | | | |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------|-------|------|
| Dead load (normal load) | D = Solar energy module self load : 0.075 kN/m^2 | | | |
| Wind load(horizontal load) : W | | | | |
| Basic wind speed | 20m/s | 25m/s | 30m/s | |
| Importance factor (I_w) | 1.0 (power plant : importance High) | | | |
| Gust influence coefficient (G_f) | 1.8 | | | |
| Wind force coefficient (C_f) | 30° | 1.2 | 15° | 0.85 |
| Load combination | D + W | | | |
| Material | SS400 | | | |

2.3 Mesh Free 해석

본 해석에서 사용된 무요소법(Mesh Free) 해석 소프트웨어는 DAFUL이다. 이 소프트웨어는 Mesh를 이용하는 기존 유한요소 해석과는 달리 Mesh를 생성하지 않고 구조해석을 가능하게 한다.

해석 시 요구되는 어려운 Mesh작업이 필요없기 때문에 복잡한 형상도 손쉽게 해석 가능한 장점을 가지고 있다.

또한 MeshFree는 단시간 내에 다양한 설계변수를 고려하여 구조해석 결과를 얻을 수 있는 DAFUL만의 고유한 자동화 모델링 방법을 제공한다. Mesh를 생성하지 않기 때문에, Mesh 생성 작업 시 생기는 요소 생성 방법이나 요소 선택의 고민이 불필요하며 누구나 손쉽게 해석이 가능하고 Geometry 변경에 능동적인 대처가 가능하다. CAD Geometry 자체를 이용한 편리하고 직관적인 모델링 방법을 제공하고 있어 사용이 용이하며 여러 개의 바디로 이루어진 시스템 구성이 가능하도록 Multi-Solid를 지원한다. 추가적으로 Local Refinement를 활용하여 응력이 많이 발생하는 부분에만 많은 Node를 사용하게 되어 적은 자유도로 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 사용자가 편리하게 Level을 선정하고 그 결과를 비교할 수 있다.

3. 해석 결과 및 검토

3.1 MeshFree를 위한 Node 및 Seed Point

구조물에 대해 MeshFree해석을 위한 Node를 생성하였다. MeshFree해석을 위해서는 고체영역에 표면격자의 점이 생성되어야 한다. DAFUL 자체의 MeshFree 탭의 Leveling을 이용하여 Node를 생성하였다. 노드의 경우 DAFUL의 Level 3단계를 이용하여 노드간의 간격을 X축 30.06mm, Y축 29.6mm, Z축 30.63mm로 설정하였고, 통상적으로 3단계 이상이면 해석품질은 양호하다고 볼 수 있다. 추가적으로 두께가 너무 얇은 곳에는 Node를 생성하기 어려우므로 추가적으로 52개의 Seed Point를 설정하여 주었다.

Table 2. Informations of Meshfree analysis node

| Axis | X | Y | Z |
|-------------------|-------|------|-------|
| Node distance(mm) | 30.06 | 29.6 | 30.63 |

3.2 해석 조건

풍압은 풍속의 제곱에 비례하며, 건축구조기준에 따라 여러 가지 영향 풍압은 풍속의 제곱에 비례하며, 건축구조기준에 따라 여러 가지 영향계수를 반영하여 산출한다. 독립편지붕의 설계속도압(Pr) (KBS2009, 0305.3.2.)은 다음 식으로 산정한다. 본 연구에서 수행한 접이식 태양광 발전 구조물의 경우 독립편지붕은 벽면이 없이 기둥부재에 편지부만 있는 지붕구조물로 간주하였다.

1) 설계풍속(0305.5.1.)

$$V_z = V_0 \cdot K_{zr} \cdot K_{zt} \cdot I_w \text{ (m/s) (0305.5.2)}$$

$$V_0 : \text{기본풍속 (m/s) (0305.5.2, 0305.5.1)}$$

$$K_{zr} : \text{풍속고도분포계수 (0305.5.3)}$$

$$K_{zt} : \text{지형계수 (0305.5.4)}$$

$$I_w : \text{건축물의 중요도계수 (0305.5.5.)}$$

2) 설계높이에 대한 설계속도압 q_z

$$q_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_z^2 \text{ (N/m}^2\text{) (KBC2009, 0305.5.1.a)}$$

$$\rho : \text{공기밀도 } 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$V_z : \text{설계지역의 지표면으로부터 임의높이 Z에 대한 설계풍속 (m/s)}$$

$$P_r = q_z \cdot G_f \cdot C_f \text{ (N/m}^2\text{) (KBC2009, 0305.3.3.)}$$

여기서,

$$q_z : \text{지표면 임의 높이 z에 대한 설계속도압 (N/m}^2\text{)}$$

$$G_f : \text{주 골조설계용 풍방향 가스트 영향계수, 바람의 난류로 인해서 발생하는 구조물의 동적 거동성분을 나타내는 것으로 평균변위에 대한 최대변위의 비를 통계적인 값으로 나타낸 계수}$$

$$C_f : \text{풍력계수}$$

Table 3. Wind pressures by angle, velocity

| Wind pressures(Pr) | 20m/s | 25m/s | 30m/s |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 15° | 868.48 Pa | 1154.63 Pa | 1662.57 Pa |
| 30° | 1043.19 Pa | 1630.07 Pa | 2347.16 Pa |

Table 4. Combined load(wind load+self load)

| Wind pressures(Pr) | 20m/s | 25m/s | 30m/s |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 15° | 943.48 Pa | 1229.63 Pa | 1737.57 Pa |
| 30° | 1118.19 Pa | 1705.07 Pa | 2422.16 Pa |

해석에 사용된 물성치는 다음과 같다.

Table 5. Material informations

| Type | SS-400 | Air |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Density | 7.85g/cm ³ | 1.29kg/m ³ |
| Tensile strength (N/mm ²) | 400 ~ 510 | - |
| Yield strength (N/mm ²) | 235 | - |
| Elongation(%) | 23 over | - |

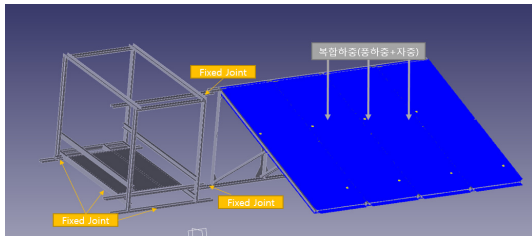


Fig. 2. Pressure load by DAFUL

3.3 해석 결과

접이식 태양광 구조물의 2개의 경우(15° 및 30°)에 대해 풍하중 20m/s, 25m/s, 30m/s 3가지 경우에 대하여 구조해석을 수행하였다.

전체 구조물에 대한 Total Deformation과 Von-Misses Stress를 계산하였다. 가운데 연결 구조물의 경우는 강체로 구성하고 변화를 보고자 하는 태양광 패널이 연결되어 있는 부분을 선택적으로 Mesh Free 모델로 구성하였다. 해석결과를 보면 15°의 경우 최외각 측 태양광 패널 부분에서 풍하중 작용 시 최대변형이 일어나는 것을 확인 할 수 있으며 중앙 구조물에 접속 하는 부분에서 최대응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 30°의 경우 Max Stress는 올라가지만 15도의 최대 Stress가 나타나는 위치에서의 값은 오히려 줄어들은 것을 확인할 수 있다. 이는 각도가 커짐에 따라서 풍하중의 힘 자체는 앞서 계산대로 커지지만 구조물이 구성하는 각도에 의해 힘이 분산되기 때문에 30°의 경우가 더 안정적으로 나타나는 것으로 파악할 수 있다. 하지만 태양광 패널의 지지대가 구조물에 접속하는 부분에서 응력이 크게 발생하기 때문에 지지대의 끝단에 캐스터 부착을 통해 응력을 분산시키는 방법으로 해결하고 구조물 접속 부위의 Max Stress의 경우 SS400구조물의 허용응력을 넘어가 위험할 것으로 예상되어 이를 보완하기 위해 최외각 측에 구조물의 안정성을 위한 지지대 삽입 모델링

수정을 진행하였다.

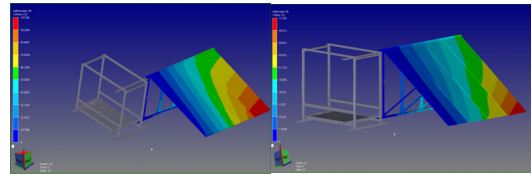


Fig. 3. Deformations by angle wind pressure 20m/s (Left : Angle 15°, Right : Angle 30°)

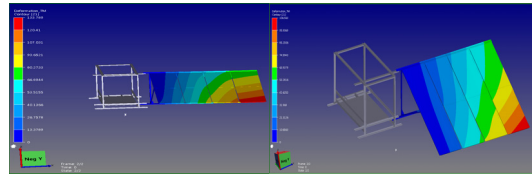


Fig. 4. Deformations by angle wind pressure 25m/s(Left : Angle 15°, Right : Angle 30°)

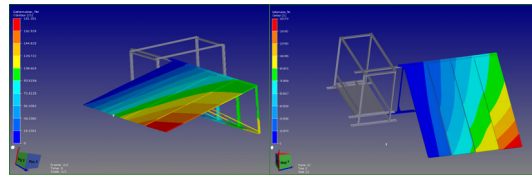


Fig. 5. Deformations by angle wind pressure 30m/s(Left : Angle 15°, Right : Angle 30°)

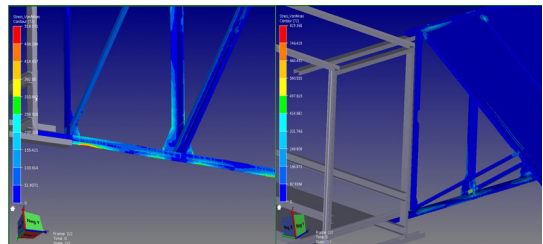


Fig. 6. Stresses by angle wind pressure 20m/s (Left : Angle 15°, Right : Angle 30°)

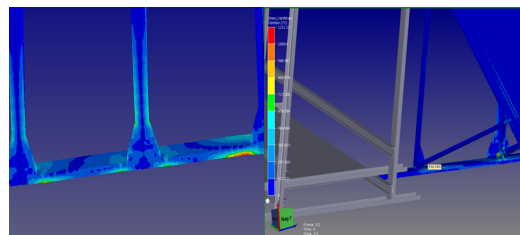


Fig. 7. Stresses by angle wind pressure 25m/s (Left : Angle 15°, Right : Angle 30°)

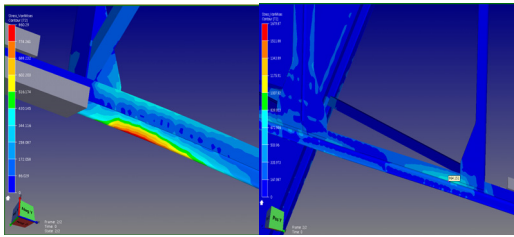


Fig. 8. Stresses by angle wind pressure 30m/s (Left : Angle 15°, Right : Angle 30°)

3.4 리모델링 재해석 결과

지시대가 추가된 구조물의 경우 배치각 30° 풍량 30m/s의 동일한 조건에서 기존 구조물 Fig. 8의 우측그림과는 다르게 Fig. 9에서 보아 알 수 있듯이 기존 취약부에서의 응력이 40Mpa로 줄어들었음을 확인할 수 있다. 또한, SS400의 항복응력(235MPa)보다 작은 응력이 작용하고 있음을 알 수 있으며, 구조물도 안전하다고 판단된다.

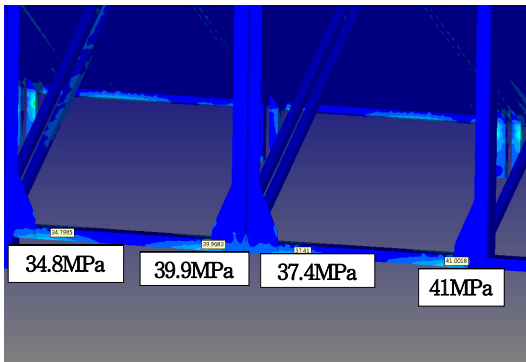


Fig. 9. Results of stress (Additional Support fixture angle 30°, wind pressure 30m/s)

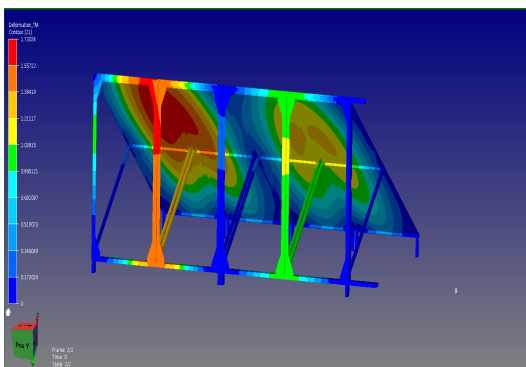


Fig. 10. Results of Max deformation : 1.73mm

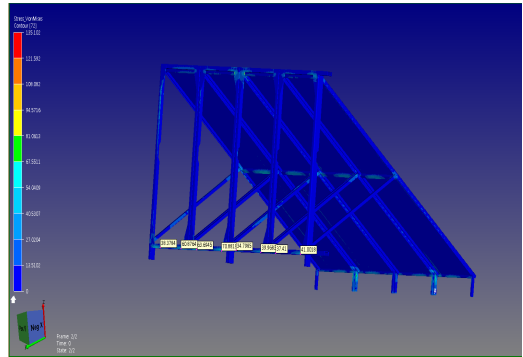


Fig. 11. Results of Max stress : 35.1MPa

4. 풍하중 실험

4.1 실험 방법

접이식 태양광 발전 구조물의 구조적 안정성 확인을 위해 풍하중 실험을 수행하였다.

내풍압성 검증을 위하여 기존 커튼월 등 시험에 사용하는 AAMA 501.1-05를 인용하여 시험을 진행하였다.

- 1) 아래 그림과 같이 시험체를 4구역으로 구분하여 풍력을 가한다.
- 2) A구역 정면에 강풍재연시험기를 설치하고 15분간 25m/s의 강풍을 가한다.(시험체로부터 강풍재연시험기의 거리는 해당 풍속을 충분히 유지할 수 있는 위치에 설치한다.)
- 3) 같은 방법으로 B-D구역 까지 강풍을 가한다.
- 4) 시험체의 D구역 후면에 강풍재연시험기를 설치하고 15분간 25m/s의 강풍을 가한다.
- 5) 같은 방법으로 C-A구역까지 강풍을 가한다.
- 6) 육안 상 태양광 모듈의 탈락 또는 구조체 결속해지 등 이상여부를 확인한다.

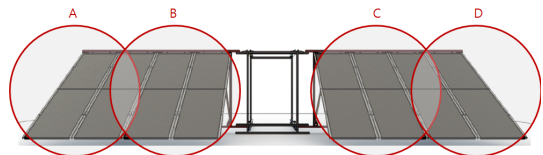


Fig. 12. Wind load test mock up

육안 검사 이후 해석결과와 실험결과값을 비교하기 위해 스트레인게이지를 13군데에 부착시키고 해당 부위에 발생하는 변형량을 측정하였다.



Fig. 13. Location of Strain gauge test

4.2 실험 결과

접이식 태양광 발전 구조물의 풍하중 실험 결과 외관 상 모듈의 탈락 또는 구조체 결속 해지등의 이상이 발생 하지 않음을 확인 할 수 있었다.



Fig. 14. Wind load Test(Front)



Fig. 15. Wind load Test(Back)

또한, 스트레인 게이지를 부착한 실험에서는 다음과 같은 결과를 얻었다. 구조물 풍압 시험은 전면 4구역, 후

면 2구역으로 구분하여 총 6회의 풍압시험을 실시하였다. 구조물에서 발생하는 최대 스트레인 값은 22×10^{-5} 으로 이를 응력($\sigma = E \times \epsilon$)으로 환산할 경우 풍압 시험 시 구조물에 발생하는 최대응력은 36.9Mpa로 산출되었다. 이는, 해석 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 16, 17은 Fig. 13에서 가장 응력을 많이 받을 것으로 추정되는 부위의 실험 결과값을 나타내고 있다.

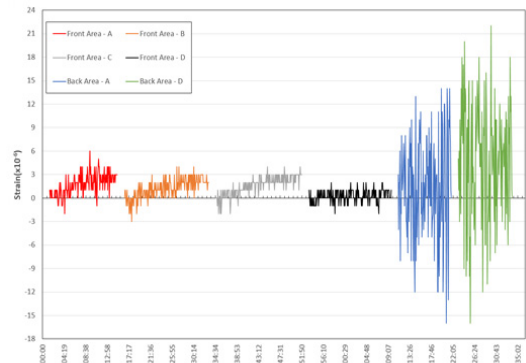


Fig. 16. Result of Channel 6 about strain gauge test

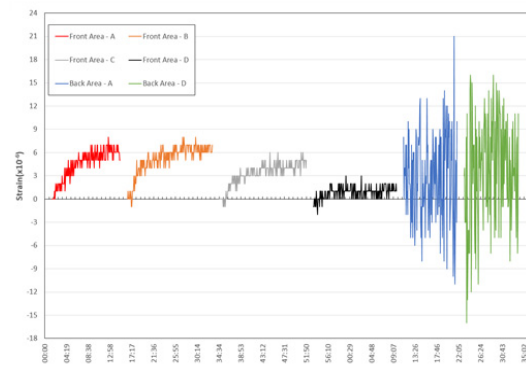


Fig. 17. Result of Channel 11 about strain gauge test

5. 결론

접이식 태양광 발전 구조물의 구조해석 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 배치각 30° 풍량 30m/s의 동일한 조건(풍압 2.4kPa)에서 구조물의 취약부분에서 약 864MPa 이 나타나는 것으로 확인되었다.

- 2) 안정성 확보를 위해 추가 지지대를 구성한 후 재해석을 진행하여 구조물의 안정성을 확보하였다.
- 3) 그 결과 기존 취약부에서 41MPa로 응력이 감소된 결과와 약 95.26%의 응력 감소율을 얻었다.
- 4) 또한, 취약부에 사용된 소재 SS400의 물성치를 고려해봤을 때 41MPa라는 값은 풍속 30m/s라는 가혹한 환경에서 안전율(S) 약 5정도로 안전하다고 판단된다.
- 5) 풍하중 실험 결과 실험 결과 조건인 육안 상 태양광 모듈의 탈락 또는 구조체 결속 해지 등의 이상여부가 나타나지 않았다.
- 6) Meshfree를 이용하여 시뮬레이션 한 결과 풍하중 실험과 비교하여 객관적 안정성을 만족하였으므로, 본 연구를 통해 Meshfree에 대한 신뢰성을 확보하였다.

References

- [1] G. I. Song, "Solar Industry Developing Status and Prospects in RPS", Journal of the KSME, vol. 52, no. 3, pp. 42-46, Mar. 2012.
- [2] E. C. Jo, W. J. Lee, M. S. Jeon, J. S. Lee, "The Present and Future of Solar technology", Journal of the KSME, vol. 49, no. 11, pp. 28-33, Nov. 2009.
- [3] H. J. Lim, H. W. Noh, Y. S. Lim, D. H. Kim, "Direction and Strategy of PV R&D Technical Programs of Korea for the Next Decade", The Korean Society For New And Renewable Energy, pp. 406-407, May 2008.
- [4] Y. E. Kim, K. W. Jeong, J. J. Lee, "Wind load analysis for designing a tracking solar generator", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 18, No. 2, pp. 672-680, February 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.2.672>
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT), Korea Building Code 2016, <http://www.kecc.re.kr/File/2/CIGCDCF90037/CIGCDCF90037.pdf>, (accessed. Dec., 09, 2016).

손 창 우(Chang-Woo Son)

[정회원]



- 2014년 2월 : 인천대학교 기계로봇 공학과(공학사)
- 2016년 2월 : 인천대학교 기계공학과(공학석사)
- 2018년 4월 ~ 현재 : 인천대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

초정밀가공, 정밀금형가공, CAD/CAM/CAE

서 태 일(Tae-II Seo)

[정회원]



- 1999년 12월 : 인하대학교 기계기술공동연구소 전임연구원
- 2001년 2월 : 한국생산기술연구원 정밀금형팀 선임연구원
- 2003년 7월 : 인천대학교 기계공학과 부교수
- 2012년 10월 : 인천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

정밀금형가공, CAD/CAM/CAE 통합시스템, 태양열발전

김 태 균(Tae-Kyun Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 인천대학교 기계로봇 공학과(공학사)
- 2017년 2월 : 인천대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

기계재료, 정밀가공, CAD/CAM/CAE