



풍하중을 고려한 수직형 태양광 패널 고정용 메인 포스트의 경량화를 위한 보강구조 연구

장민지^b, 곽시영^{a,b,*}

Research on the Reinforcement Structure to Reduce the Weight of the Main Post of Vertical Photovoltaic Systems Considering Wind Loads

Minji Jang^b, Si-Young Kwak^{a,b,*}^a Smart Liquid Processing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)^b Department of Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science and Technology (UST)

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 October 2023
Revised 1 November 2023
Accepted 2 November 2023

Keywords:

Vertical photovoltaic system
Wind load
Structural analysis
H-Beam

ABSTRACT

Photovoltaic systems are emerging as next-generation energy sources that can solve the issues of fuel depletion and environmental pollution caused by the indiscriminate use of energy resources. Unlike traditional photovoltaic systems, vertical photovoltaic structures are installed vertically to save space and for other advantages such as windproofing. However, owing to its lower wind resistance, the stability of the vertical solar panel must be reviewed carefully. This study designs the main post of a vertical photovoltaic system using the commercial FEA program Abaqus, with wind loads calculated by Korea Design Standard (KDS) 14, to analyze the stability of the support structure of solar panels at 45 m/s. Alternative models are proposed depending on the height of the main post of the photovoltaic system and the reinforcement method to reduce the weight of the structure. Structural analysis is performed to compare each model and the main post with the most efficient structure.

1. 서론

전 세계적으로 무분별한 에너지 사용으로 인한 자원의 고갈과 환경 오염 문제가 제기됨에 따라 친환경 에너지에 대한 중요성이 대두되고 있다. 이에 따라 다양한 신재생에너지 중 상대적으로 설치가 쉽고 유지보수가 용이한 태양광 발전이 주목받고 있으며 설치 장소에 구애받지 않아 다양한 형태로 발전되어 왔다.

태양광 구조물은 바람에 의한 영향을 가장 크게 받기 때문에 설치와 운영에 있어 풍하중의 영향을 관리하는 것이 주요 과제 중 하나이다. 경사지게 설치되는 일반적인 태양광 구조물에서 김용우 등은 태양광 추적 구조물의 태양 전지판의 경사 각도가 변화함에

따라 구조물이 받는 풍하중을 계산하였으며^[1], 손창우 등은 이동의 편리와 설치 용이성 등을 고려하여 접이식으로 설계된 태양광 발전 구조물^[2,3]에서, 김영은 등은 이중 윗기어식 태양광 추적 구조물에서의 풍하중 해석 연구를 진행하였다^[4]. 그러나 기존 태양광 발전 구조물은 주로 경사형으로 설치되기 때문에 설치 공간을 확보하기가 어렵다는 문제점이 있다. 최근에는 Fig. 1과 같이 구조물을 수직으로 설치하여 지리적 단점을 보완하고 동시에 방풍이나 방음과 같은 부가적인 효과를 창출하려는 움직임이 있다. 또한, 패널을 수직으로 설치할 경우 그림자나 눈에 의한 출력 저하를 막을 수 있어 효과적인 발전 효율을 기대할 수 있을 것이다. 그러나 수직형 태양광 패널은 풍하중에 대한 내풍도가 현저히 떨어지나 설계 정

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8084-8801

E-mail address: vlvwlw@kitech.re.kr (Si-Young Kwak).



Fig. 1 Vertical photovoltaic power generation structure (Next2Sun www.next2sun.de)

보가 부족하여 안전성을 위해 매우 큰 규격의 보를 사용하고 있어 구조물의 크기를 증가시키고 설치원가가 상승한다는 단점이 있다. 본 연구의 목표는 상용 해석 프로그램 Abaqus를 사용하여 기준 풍하중을 버틸 수 있는 수직형 태양광 발전 구조물에서 태양광 패널을 지지하는 메인 포스트의 경량화 방안을 모색하기 위해 수행되었다.

2. 수직형 태양광 구조물 설계

2.1 수직형 태양광 구조물의 해석 모델

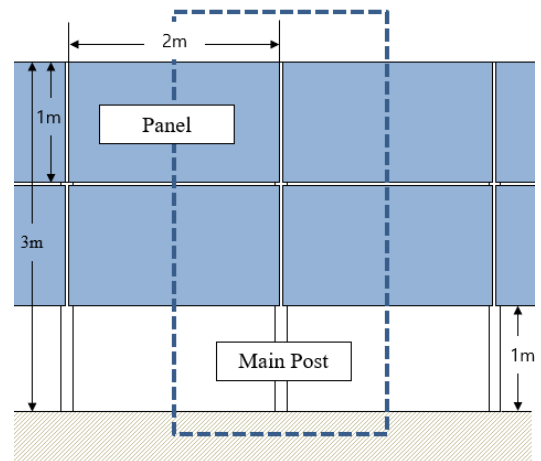
수직형 태양광 발전 구조물은 Fig. 2와 같이 태양광 패널 모듈과 패널을 고정하는 포스트로 구성된다. 메인 포스트는 풍하중 작용 시 발생하는 굽힘을 고려하여 H-Beam을 사용하였으며 포스트의 높이는 토양에 의한 모듈의 오염을 방지하기 위해 지면에서 모듈까지 1m의 여유를 둔다고 가정한다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 설계의 편의성을 위해 하중 조건을 만족하는 메인 포스트를 먼저 선정하고 후 전체 모델에 적용하여 결과 값을 비교하였다. 태양광 모듈과 주요 지지부재로 사용된 H-Beam은 설계 이후의 복잡한 형태를 고려하여 solid 요소로 모델링 하였다.

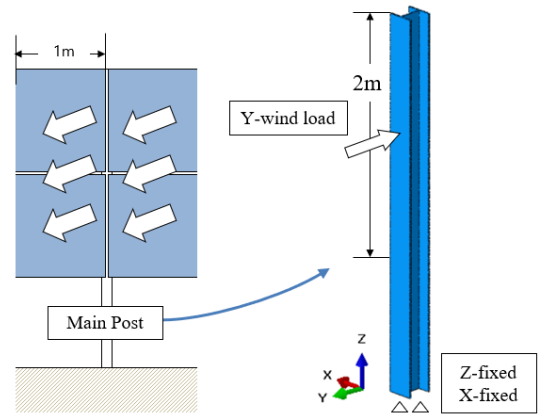
2.2 풍하중 산정

국내 건축물 시설물의 내풍 설계 기준은 25~45 m/s로 대다수의 건물에 설치되는 태양광 구조물의 경우 풍속 30 m/s가 기준이 된다. 그러나 바람의 영향이 강하고 태풍에 지속적으로 노출되는 지역은 30 m/s의 풍속으로는 안정성을 확보할 수 없기 때문에 본 연구에서는 내풍 설계기준의 최대풍속인 45 m/s를 채택하여 풍하중을 산정하였다.

아래는 설계 코드 KDS(korea design standard) 41 10 15 : 2019에 기반하여 풍하중을 산정한 것이다^[5]. 본 연구에서 사용한 수직형 태양광 발전 구조물은 밀폐형 독립 간판으로 간주하여 계



(a) Full model



(b) Boundary condition of analytical model

Fig. 2 Vertical photovoltaic power generation structure design

산한다. 식 (1)은 설계 풍속을 구하기 위한 식이다.

$$V = v_0 \times K_{zr} \times K_{zt} \times I_w \quad (1)$$

v_0 : 기본 풍속 (m/s)

K_{zr} : 기준 높이 H에서의 풍속고도분포계수

K_{zt} : 지형계수

I_w : 건축물의 중요도계수

풍하중에 의한 구조물의 응력 및 변위 분포를 확인하기 위하여 풍속을 45 m/s로 적용하고 풍속 고도계수 K_{zr} (KDS 2019, 5.5.3)는 평탄하고 장애물이 거의 없는 지역에서 1.13, 설치 지역이 평탄할 때 지형계수 K_{zt} (KDS 2019, 5.5.4)는 1.0, 중요도계수 I_w (KDS 2019, 5.5.5)가 1.0 임을 고려하였을 때, 설계 풍속 V은 50.9 m/s이다.

기준 높이 H에서의 설계속도압 q_H 는

$$q_H = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \quad (2)$$

이고 여기서 밀도 ρ 는 공기밀도로서 균일하게 1.22 kg/m^3 로 가정한다. 따라서

$$q_H = 1.58 \text{ kN/m}^2$$

이다. 밀폐형독립벽체 및 밀폐형독립간판 풍방향 풍압력을 W_D 라고 할 때,

$$W_D = q_H \times G_D \times C_D \times A \quad (3)$$

q_H : 지표면으로부터 높이 H에서의 속도압 (N/m^2)

G_D : 풍방향거스트영향계수

C_D : 풍력계수

A : 독립 간판의 총면적 (m^2)

KDS 41 10 15 : 2019, 5.7.3절에 의해 밀폐형독립벽체에서 긴 펜스일 경우 풍력계수 C_D 는 1.30이며 주골조설계용 풍방향가스트영향계수 G_D 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$G_D = 1 + 4\gamma_D \sqrt{B_D} \quad (4)$$

$$\text{단, } B_D = 1 - \left[\frac{1}{1 + 5.1(L_H/\sqrt{HB})^{1.3} (B/H)^{0.33^{1/3}}} \right]$$

$$L_H = 100 \left(\frac{H}{30} \right)^{0.5}$$

B_D : 비공진계수

L_H : 기준높이에서의 난류스케일 (m)

B : 건축물의 폭 (m)

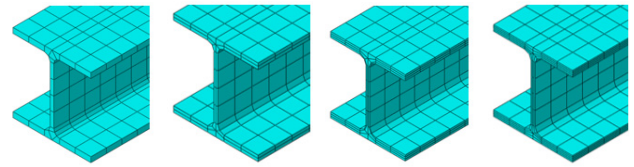
H : 건축물의 기준높이 (m)

건축물의 폭 B와 기준높이를 고려하여 비공진계수 B_D 가 2.0915임을 알 수 있으며, 따라서 거스트 영향계수 G_D 는 2.09이다.

식 (3)에 의해 계산된 전체 해석 모델에 적용되는 풍방향풍압력 W_D 는 4,293 Pa이다.

2.3 얇은 부재에서의 요소 민감도

Solid 요소로 구성된 얇은 부재의 유의미한 해석 결과를 위해 한쪽 끝이 고정된 3 m 높이의 150×150 mm H-Beam에 10 kN의 집중 하중이 작용하였을 때 이론값과 요소 층수에 따른 해석 값의 오차율을 비교하였다. 아래 그림은 요소 층이 1층일 때와 2층, 3층,



(a) 1 layer (b) 2 layers (c) 3 layers (d) 4 layers

Fig. 3 Mesh shape for element sensitivity test

Table 1 Analysis results according to number of mesh layers

Number of mesh layers	1	2	3	4
Max. stress (MPa)	123.4	131.2	133.6	135.4
Error rate (%)	9.86	4.16	2.41	1.09

4층일 때의 요소 형태를 나타낸 것이다.

Table 1에서의 결과를 바탕으로 얇은 부재에 4층으로 구성된 요소 층을 사용하는 것이 바람직하다고 판단하였다.

2.4 재료 물성치 및 허용응력 설정

해석에 사용된 H-Beam의 재질은 SS275로 재료의 물성치는 Table 2에 정리하였다^[6].

SS275의 허용응력은 KDS 14 30 10^[7]의 휨을 받는 H형강의 허용휨응력 F_b 식 (5)를 사용하여 181.5 MPa로 설정하였다.

$$F_b = 0.66 \times F_u \quad (5)$$

F_u : 강재의 인장강도

3. 해석 결과

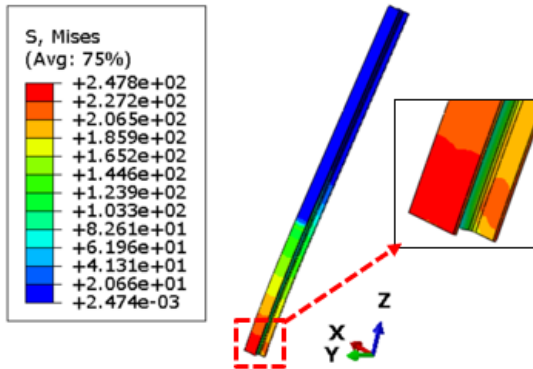
3.1 메인 포스트 설계 방안

수직형 태양광 구조물에서 패널을 지지하고 있는 메인 포스트의 하단에 가장 많은 응력이 발생한다. 따라서 규격화된 H-Beam에 풍하중이 작용하였을 때 허용 응력을 만족하는지 검토하고 만족하지 않는 부재의 하부를 보강하는 방향으로 경량화하고자 한다.

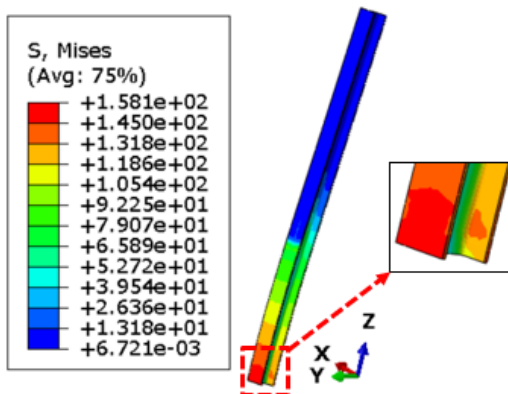
Fig. 4의 (a)는 3 m 높이의 125×125 mm H-Beam, (b)는 150×150 mm H-Beam의 Von-Mises 응력 해석 결과로, 단면적이 넓은 (b)에서의 최대응력은 158.1 MPa로 허용응력 181.5

Table 2 Material properties of SS275

Property	Value	Unit
Density	7.85	g/cm^3
Poisson's ratio	0.3	-
Young's modulus	200	GPa
Yield strength	275	MPa



(a) 125×125 mm H-Beam stress analysis result (Von-Mises)



(b) 150×150 mm H-Beam stress analysis result (Von-Mises)

Fig. 4 Stress analysis result of standard H-Beam

MPa를 만족하나 (a)는 247.8 MPa로 허용응력을 만족하지 않는 것을 알 수 있다.

부재의 경량화를 위해 3 m 높이의 125×125 mm H-Beam의 하부 보강 방안을 Fig. 5에 나타내었다. Type A는 응력이 많이 발생하는 하단에 150×150 mm H-Beam을 연결한 구조이고 Type B는 10 mm 두께의 보강대를 댄 구조이다.

3.2 메인 포스트 해석 결과

a. Type A의 해석 결과

Table 3은 Fig. 5(a)의 Type A에서 150×150 mm H-Beam의 높이 h에 따른 최대 응력 값을 나타낸 표이다. Fig. 6은 높이 h가 800 mm일 때의 응력 해석 결과를 나타낸 그림으로, 단면 치수가 서로 다른 H-Beam의 연결 부위에 허용응력을 만족하는 최대 응력 168.5 MPa가 발생한다. 그러나 연결 부위의 불연속적인 형상에 의한 응력 집중 현상이 우려되며 부재 간 과도한 용접 등 추가 작업이 필요할 것으로 판단된다.

b. Type B의 해석 결과

Table 4는 Fig. 5(b)의 Type B에서 보강대와 부재가 이루는 각도 θ 에 따른 최대 응력 값을 나타낸 표로, 보강대의 길이는

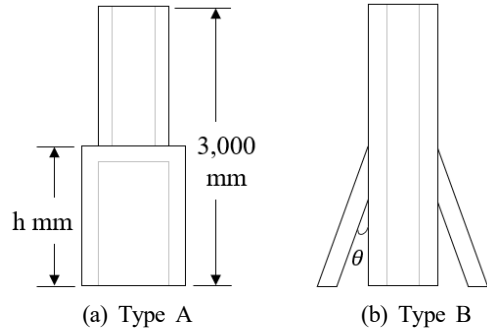


Fig. 5 Design concepts of main post

Table 3 Type A Stress analysis results according to height h

h (mm)	400	600	800
Max. stress (MPa)	218.3	192.5	168.5

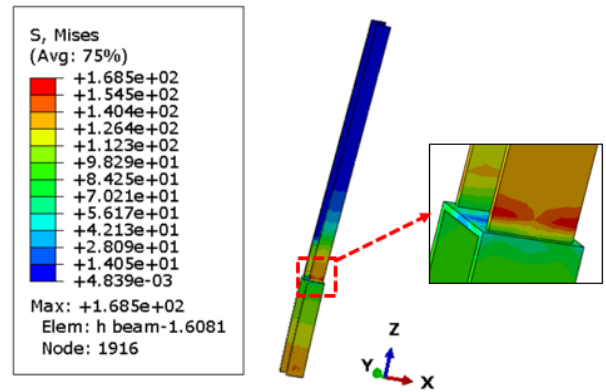


Fig. 6 Type A Stress analysis result when h: 800 mm (Von-Mises)

800 mm로 가정하였으며 각도가 작아짐에 따라 최대 응력이 작아지는 것을 알 수 있다. 보강대 연결 부위에 최대 응력이 발생하며, 각도 θ 가 5°일 때 가장 작은 최대 응력 142.4 MPa가 발생하였다.

Table 5는 추가적인 경량화를 위해 보강대와 부재가 이루는 각도 θ 가 5°일 때, 보강대 높이에 따른 응력 해석 결과를 나타낸 표이다. 높이 500 mm의 보강대를 사용했을 때 발생하는 최대 응력 176.8 MPa는 허용응력을 만족하므로 해당 치수의 보강대를 사용

Table 4 Type B stress analysis results according to angle θ

θ (°)	45	30	15	5
Max. stress (MPa)	203.8	176.2	161.8	142.4

Table 5 Type B stress analysis results according to rib height

Rib height (mm)	400	500	600	800
Max. stress (MPa)	189.7	176.8	163.9	142.4

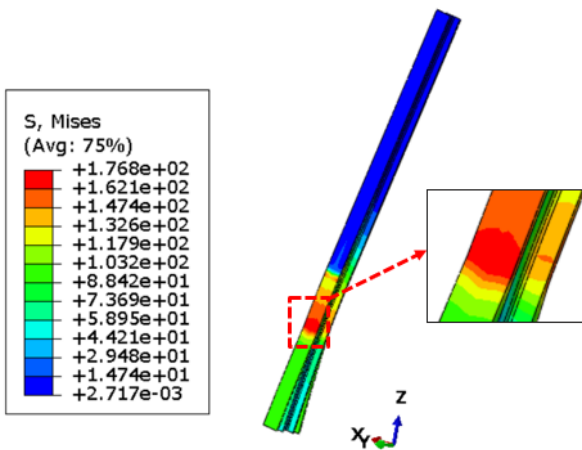


Fig. 7 Type B stress analysis result (angle: 5°, rib height: 500 mm) (Von-Mises)

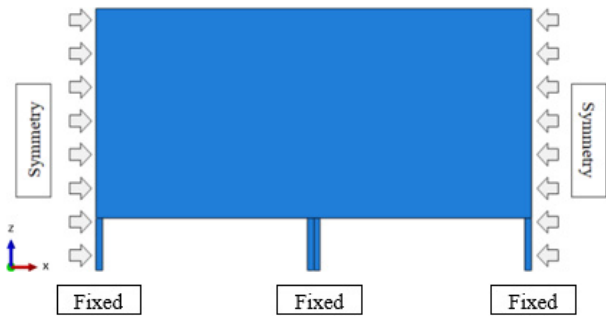


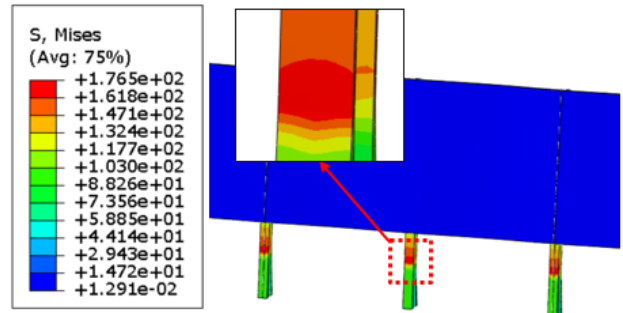
Fig. 8 Full modeling with Type B applied

한 모델을 최종 보강구조로 선정하였다. Fig. 7은 500 mm 보강대를 3 m 높이의 125×125 mm H-Beam 하부에 5°의 각도로 경사지게 설치한 Type B의 응력 해석 결과이다.

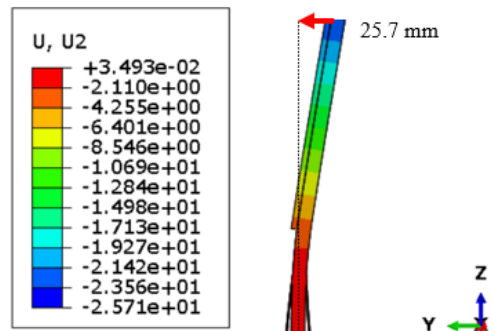
3.3 전체 구조물에서의 해석 결과

상기 절에서 허용응력을 만족하고 가장 작은 최대 응력이 발생하는 Type B 포스트를 전체 구조물로 구성하여 해석을 수행하였다. 수십 미터 내지는 수백 미터까지 길게 이어 설치되는 구조물의 특성을 고려하여 Fig. 8과 같이 일부 모델에 대칭 조건을 부여하였다.

Fig. 9의 (a)는 상기 절에서 선정한 500 mm 높이의 보강대를 사용한 Type B를 전체 모델에 적용하여 응력 해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 보강 부위에 최대 응력 176.5 MPa이 발생하며, 상기 절에서의 Type B 포스트 최대 응력 176.8 MPa과 비교하여 근접한 값이 나타난 것을 확인할 수 있다. (b)는 전체 구조물에서의 변위 해석결과로 구조물 상단이 y방향으로 -25.7 mm만큼 변형하였으나 변형 각도로 보았을 때 약 0.6°로 작은 변형임을 알 수 있다.



(a) Stress analysis result (Von-Mises)



(a) Displacement analysis result

Fig. 9 Analysis result of full model which Type B is applied

4. 결론

2개의 빔을 연결하는 Type A의 경우 하부 부재의 높이가 0.8 m일 때 최대 응력이 허용응력을 만족하나 불연속 형상에 의한 응력 집중이 우려되어 효과적이지 않다고 판단하였다. 실제 모델에서도 불연속 형상에 의한 응력 집중이 고려될만한 것인지에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

기준 풍속 45 m/s의 풍하중을 받는 수직형 태양광 발전 구조물의 경우, 주요 부재의 하부에 보강대를 경사지게 설치하는 것이 응력을 감소시키는 데 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Type B를 사용할 경우, 150×150 mm H-Beam을 사용하여 구조물을 설치하였을 때와 비교하여 약 12%의 경량 효과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

향후 유동 해석을 통해 수직형 태양광 발전 구조물을 설치했을 경우 방풍이나 방음 등의 추가적인 설치 효과를 구상할 수 있을 것이며 지리적 한계를 극복함과 동시에 부가적인 기능을 갖춘 복합 기능 구조물로서 다양한 발전이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 “Add-on 모듈 탑재를 통한 지

능형 뿌리공정기술 개발(EO230007)” 사업의 일환으로 연구되었습니다.

References

- [1] Kim, Y. W., Kim, W. B., 2012, Stress Analysis on a Structure of Solar Tracker Subjected to Wind Load, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 21:5 747-754, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.5.747>.
- [2] Son, C. W., Kim, T. K., Seo, T. I., 2018, Wind Load Analysis of Structure for Folding Solar Power System, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 19:8 1-7, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.8.1>.
- [3] Son, C. W., Seo, T. I., Song, G. H., Lee, S. H., Kim, T. K., 2017, A Study on the Wind Load Analysis of Solar Collecting System Using Single-module Reflectors, Proceedings of 2017 Winter Conference of Society for Computational Design and Engineering, 696.
- [4] Kim, Y. E., Jeong, K. W., Lee, J. J., 2018, Development of a Dual Worm Gear Solar Tracker Structure Considering Wind Load, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 27:2 146-153, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.2.146>.
- [5] KDS(Korea Design Standard), 2019, Architectural Structural Standard Design Load, KDS 41 10 15:5.11.1, Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- [6] KS D, 2018, Rolled steel for general structures, KS D 3053, Korean Agency for Technology and Standards.
- [7] KDS(Korea Design Standard), 14 30 10 2019, Steel Structure Design Standard (Allowable Stress Design Method), KDS 14 30 10, Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- [8] Kwak, S. Y., 2021, A Study on How to Reduce the Weight of Vertical Photovoltaic Structure, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf. 2021, 120.



Minji Jang

Master's Degree Student in the Department of Industrial Technology, UST.

Her research interest is Structural Analysis.

E-mail: minj0618@kitech.re.kr



Si-Young Kwak

Principal Researcher in KITECH.

His research interest is Structural Analysis, Performance Assessment and Engineering S/W Development.

E-mail: vlvvlw@kitech.re.kr