

극한 환경에서의 154kV 송전탑 안정성 향상을 위한 구조해석 및 설계 기준 개선에 관한 연구

박현의¹ · 유송희² · 권용성^{3*}

¹학사과정, 한동대학교, 기계제어공학부, ²조교수, 한동대학교, 공간환경시스템공학부, ³조교수, 한동대학교, 기계제어공학부

A Study on Structural Analysis and Design Criteria Improvement for Enhancing Stability of 154kV Transmission Towers in Extreme Environment

Park, Hyunui¹, You, Songhee², Kwon, Youngsung^{3*}

¹B.A., School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University, Pohang, 37554, Korea

²Professor, School of Spatial Environment System Engineering, Handong Global University, Pohang, 37554, Korea

³Professor, School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University, Pohang, 37554, Korea

Abstract - Recent incidents of transmission tower collapses due to extreme weather events such as powerful hurricanes and tornadoes have been on the rise globally. In response, this study aims to ensure stability of transmission towers under extreme environmental conditions. Using Ansys 2024 R1, a structural analysis model comprising 1,108 beam elements was constructed, and galloping phenomena were simulated using fluctuating wind speed data. The simulation revealed a maximum displacement of the transmission line at 6.28 meters, indicating inadequacy of the current standard clearance distance criterion. Additionally, under extreme conditions, the maximum deformation of transmission towers increased by approximately 6.34 times compared to standard design criteria, with an approximately 7.5 times increase in axial load and a 65.81% decrease in safety margin. These findings underscore the necessity for new design criteria to enhance the structural stability of transmission towers under extreme weather conditions. The proposed structural analysis and stability evaluation method presented in this paper are anticipated to contribute significantly to the improvement of durability and stability in future transmission tower design.

Keywords - Transmission tower, Transmission line, Stability, Abnormal climate conditions, Inter-phase spacing, Dynamic wind speed data

1. 서론

최근 AI 기술 발전 및 관련 산업의 성장으로 인해 데이터 센터의 규모가 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 데이터 센터가 필요로 하는 전력 소비량도 증가하고 있다^[1]. 이러한 추세를 반영하여 제10차 장기 송·변전 설비 계획^[2]에서는 2036년까지 신규 전력 수요를 고려하여 추가적인 송전탑과 송전선로의 건립 계획을 수립하였다.

송전탑과 송전선은 단면적에 비해 길이가 긴 구조적 특징을 가지고 있어 바람의 영향을 크게 받는다. 송전탑의 경우, 풍압 설계 하중이 전체 하중의 약 70%~90%를 차지하므로, 풍압 하중의 정확한 계산은 송전탑의 안정성(Stability) 유지에 매우 중요한 요소로 작용한다^[3]. 현재 국내에서 사용되는 가공 송전용 철탑 설계기준(DS-1111)^[4]은 풍속에 따라 지역을 구분하고, 지역별 평균 풍속을 기준으로 풍압 하중을 계산하는 정적 풍압 하중 계산 방식을 사용한다. 그러나 정적 풍압 하중 계산 방식은 풍속의 동적 성분을 고려하지 못하는 단점이 있다.

최근 미국 휴스턴, 중국 광둥성, 브라질 남부에서는 이상 기후로 인해 발생한 토네이도와 강력한 태풍으로 인한 정전 피해가 발생하였다. 특히 미국 휴스턴에서는 시속 170 km/h를 넘는 강풍으로 인해 송전탑이 붕괴하

Note.-Discussion open until April 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 10, 2024; revised August 4, 2024; approved on August 26, 2024.

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-054-260-1841 Fax. +82-054-260-1841

E-mail. youngsung.kwon@handong.edu

여 50만 가구가 정전되는 사고가 발생하였다^[5].

강풍에 의해 송전탑이 붕괴하는 원인을 크게 두 가지로 분류해 볼 수 있다. 첫 번째 원인은 갈러핑(Galloping) 현상이다. 강한 바람에 의해 송전선이 좌우 또는 상하로 크게 진동하는 갈러핑 현상은 송전선 간의 접촉을 유발하여 단락을 발생시킬 수 있다^[6]. 송전탑은 양 측면에 암(Arm)과 연결된 여러 개의 3상 송전선으로 구성되어 있으며, 송전선 간의 이격거리가 충분하지 않으면 강한 바람으로 인해 송전선 간의 접촉이 일어나 단락 사고가 발생할 수 있다. 정상 상태에서의 송전선은 균일한 장력을 가지므로 송전탑의 암에는 힘의 평형이 유지되고 있지만 송전선 단락 사고 발생 시, 한쪽 송전선이 단락되면 다른 한쪽 송전선에만 장력이 남아 불균형 장력이 형성되고, 이에 따라 강한 회전력이 발생한다^[7]. 이러한 강한 회전력은 송전탑 암에 변형을 일으켜 송전탑에 피로를 누적시키고, 결국 송전탑 붕괴를 초래할 수 있다^[3].

두 번째 원인은, 이상 기후 조건을 고려하는 설계기준의 미흡함이다. 강력한 태풍이나 토네이도와 같은 극한 환경에서는 풍속이 빠르게 변하므로, 이러한 동적 성분을 반영하여 송전탑의 풍압 하중을 계산하는 것이 중요하다. 그러나 현재 사용되는 표준 설계기준은 정적인 풍속만을 반영하여, 표준 설계 기준으로 건립된 송전탑은 극한 상황에서 안정성을 유지하기 어려울 수 있다.

본 연구에서는 강력한 태풍과 같은 극한 상황에서 송전선의 갈러핑 현상을 시뮬레이션하여 분석하고, 송전선 간의 접촉을 방지하기 위한 새로운 이격거리를 제안한다. 또한 강력한 태풍의 풍속 데이터를 반영한 동적 풍속 데이터(Dynamic Wind Speed Data)를 계산하여 송전탑을 구조해석하고, 그 결과를 표준 설계 기준과 비교하여 극한 상황 조건을 반영한 설계기준의 필요성을 강조하고자 한다.

2. 연구 내용

2.1 선행연구 분석

이번 연구에서는 송전탑 안전성에 관한 선행연구 사례를 분석하고 극한 환경에서 송전탑의 구조해석에 적용한다.

첫 번째로, 인천에서 발생한 송전탑 붕괴 원인을 분석한 연구^[3]는 인천 송전탑의 붕괴 원인에 대해 가공 송전용 철탑 설계기준이 돌풍과 같은 이상 기후 현상에 대한 대비가 부족한 것으로 분석하였다. 이 연구는 이상 기후 조건을 반영하는 설계기준의 필요성을 부각한다.

두 번째로, 풍하중을 받는 송전철탑의 정적, 동적 및 좌굴 해석^[9] 연구에서는 동적 성분을 반영한 풍압 하중이 송전탑에 미치는 영향을 평가했다. 해당 연구 결과 동적 성분이 반영된 풍압 하중이 구조물의 응답성을 증가시키며 태풍이나 국지적인 돌풍과 같은 환경에서 풍압 하중이 설계 하중을 넘어서는 경우에 대한 대책의 필요성을 언급한다.

세 번째로, 극한 하중 도출을 위한 비선형 해석 기법 연구^[13]에서는 구조해석 방법을 분석하였다. 기존 송전탑의 구조해석 방법은 철탑 재료의 탄성 영역 조건만을 반영하지만 탄성 영역 해석 방법은 철탑 재료의 비선형 변형과 극한 하중을 고려할 수 없으므로 송전탑의 변형을 정확하게 예측하기 어렵다는 문제점이 존재한다. 송전탑이 받는 극한 하중을 정확히 해석하기 위해서는 비선형 해석이 필요함을 서술한다.

송전탑의 합리적인 구조해석 모델 제안 연구^[8]에서는 구조해석 모델에 대해 분석하였다. 기존에 사용된 송전탑 구조해석 모델은 모든 주재를 3차원 트리스 요소로 사용하고 있으나 트리스 요소는 축 방향 하중만 해석이 가능하다는 단점이 있다. 실제 철탑의 주재는 휨 하중(Bending Force)과 축 하중(Axial Force)이 모두 작용하므로, 휨 하중과 축 하중을 모두 해석할 수 있는 보 요소 모델의 필요성을 제안한다.

선행연구 사례는 이상 기후를 반영하는 풍압 하중 설계기준, 풍압 하중의 동적 특성, 비선형 해석 기법과 보 요소를 적용하는 구조해석 모델의 필요성을 강조하고 있다. 따라서 본 연구에서는 엔시스 2024 R1을 사용하여 강력한 태풍과 같은 극한 환경 조건에서 송전선의 갈러핑 현상을 시뮬레이션하고, 송전선 간의 접촉을 예방하기 위한 새로운 이격거리를 제안한다. 또한, 보 요소를 적용한 송전탑 구조해석 모델과 비선형 동적해석 기법을 사용해 송전탑의 구조적 안정성을 평가한다.

2.2 송전탑 구조해석 시뮬레이션 환경

2.2.1 송전탑 구조해석 모델 생성

송전탑의 구조해석 모델을 실제 송전탑과 유사하게 만들수록 구조해석 결과의 신뢰성을 확보할 수 있다. 본 연구에서 사용된 송전탑 구조해석 모델은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 송전탑 구조해석 모델은 60 m의 높이를 가지며 320개의 절점과 1,108개의 보 요소로 구성되어 있다. 구조해석 모델의 주요 부재와 보조재를 모두 오일러-베르누이 보 이론에 의한 보 요소로 구성하였다. 또한 송전탑 구조해석 모델은 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 154kV급 송전탑으로 송전선의 표준 이격거리 기준은 Fig. 2와 Table 1에 제시된 바와 같다^[2]. Fig. 2와 Table 1에서 A, B, C, D는 송전탑과 송전선의 접촉을 방지하는 수평 이격거리를 나타내며, a, b, c는 송전선과 송전선의 접촉을 방지하는 수직 이격거리를

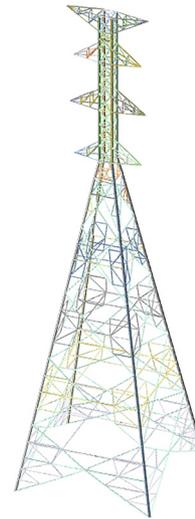


Fig. 1. Structural analysis model of 154 kV transmission tower

Table 1. Standard clearance distance for 154 kV transmission towers

Standard	Clearance Distance [mm]
A	4,100
B	3,200
C	3,700
D	3,200
a	2,500
b	6,100
c	6,100

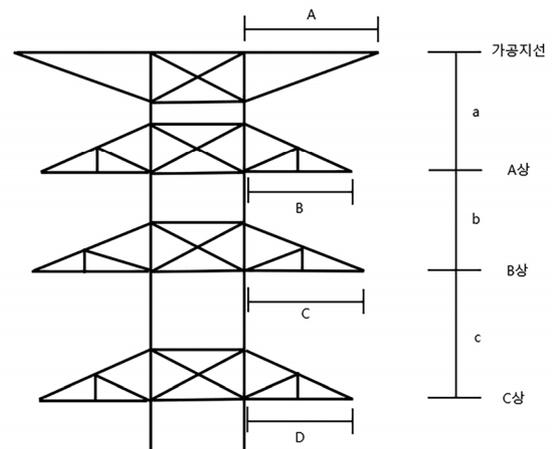


Fig. 2. Standard clearance distance for 154 kV transmission towers

Table 2. Types of principal members in transmission towers

Member	Section Specifications L x h x t [mm]
1 Main	200 x 200 x 25
2 Compression	100 x 100 x 7
3 Auxiliary	90 x 90 x 6

Table 3. Material properties of SS400 steel

Properties	SS400
Density	7850[kg · m ³]
Poisson's Ratio	0.33
Modulus of Elasticity	200[GPa]
Yield Strength	250[MPa]
Tensile Strength	400[MPa]

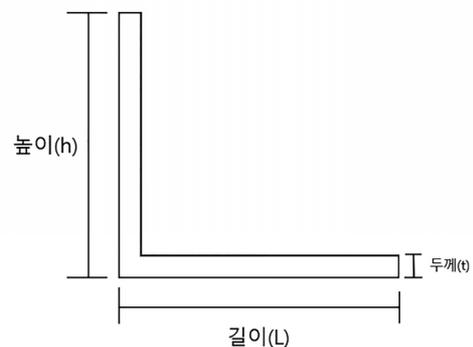


Fig. 3. Structural analysis model of transmission tower with L-shaped section

나타낸다.

송전탑 구조해석 모델에 사용한 부재는 크게 3종류이며, 주주재, 압축재, 보조재로 구분한다. 부재의 단면 (Cross Section) 형상은 L 형강(Fig. 3)이며 규격은 Table 2와 같다.

또한 송전탑의 구조해석 모델에 사용된 강재의 재료는 SS400을 사용하였으며, 구조해석에 적용한 재료의 물성 데이터는 Table 3와 같다.

2.2.2 송전탑 구조해석 하중 조건

송전탑의 안정성은 구조해석 모델에 풍압 하중, 송전선의 진동과 같은 하중 조건을 반영하여 평가할 수 있다. 송전탑에 가해지는 풍압 하중은 Fig. 4와 같이 송전탑과 송전선을 위에서 볼 때 정면과 측면 두 방향으로 구분할 수 있다.

송전선은 단면적에 비하여 길이가 긴 구조로 측면과 정면에서 본 송전선의 면적은 각각 식 (1)과 식 (2)로 구할 수 있다^[4].

$$A_{side} = d \cdot L \tag{1}$$

$$A_{front} = d \cdot l \tag{2}$$

A_{side} 는 측면에서 본 송전선 면적 $[m^2]$, A_{front} 는 정면에서 본 송전선 면적 $[m^2]$, d 는 154 kV 송전선의 지름 $[mm]$, L 은 표준 경간 길이 $[m]$, l 은 송전선 이도 길이이다 $[m]$. 가공 송전용 철탑 설계기준에 제시된 표준 경간 길이는 400 m이며, 154 kV 송전선로의 이도 길이는 12.67 m이다. 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 구한 송전선 측면의 넓이는 $11.2m^2$ 이며 정면의 넓이는 $0.354m^2$ 이다. 송전선 측면의 면적이 정면 면적보다 더 크다는 점을 확인할 수 있다. 송전선이 받는 풍압 하중은 표준 설

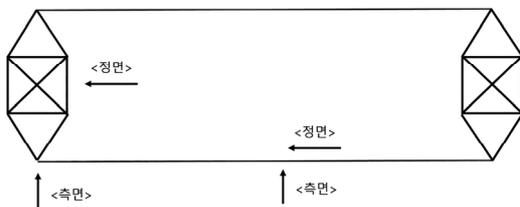


Fig. 4. Wind load direction on transmission towers and lines viewed from above

계기준에 제시된 식 (3)을 사용하여 계산할 수 있다^[4].

$$P = C \cdot q \cdot A \tag{3}$$

여기서 C 는 풍력계수, q 는 설계용 속도압력 $[kgf/m^2]$, A 는 수평면적 $[m^2]$ 이다. 송전선의 측면 면적 크기가 정면 면적보다 더 크므로, 측면에서 받는 풍압 하중이 정면에서 받는 풍압 하중보다 더 크다는 점을 확인할 수 있다.

식 (3)의 설계용 속도압력은 표준 설계 기준에 제시된 지역별 평균 풍속을 기본으로 계산한다. 평균 풍속은 속도가 변하지 않는 정적 성분을 가지고 있다. 그러나 본 연구의 목적은 극한 상황에서의 송전탑의 안정성을 평가하는 것이므로, 풍압 하중을 더 크게 받는 측면 방향 바람을 구조해석 시물레이션의 하중 조건으로 사용한다. 또한 이상 기후 조건에서 풍속은 시간에 따라 빠르게 변하므로 동적 성분을 고려하여 풍압 하중을 계산해야 하며, 동적 성분을 반영하는 풍압 하중 계산 방법은 식 (4)와 같다^[9].

$$p(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot V^2 + \rho \cdot C \cdot A \cdot \bar{V} \cdot v'(t) \tag{4}$$

식 (4)에서 \bar{V} 는 상공 체증 계수를 고려한 평균 풍속 $[m/s]$ 이며, $v'(t)$ 는 Fig. 6의 변동 풍속 데이터를 사용한다. 변동 풍속 데이터는 태풍 볼라벤의 측정된 순간풍속 크기 59 m/s를 기준으로^[10], $\pm 10\%$ 구간 내에서 무작위로 변동하는 풍속 크기 데이터를 가공하여 사용한다. 가공된 무작위로 변동하는 풍속의 예시는 Fig. 5에 그

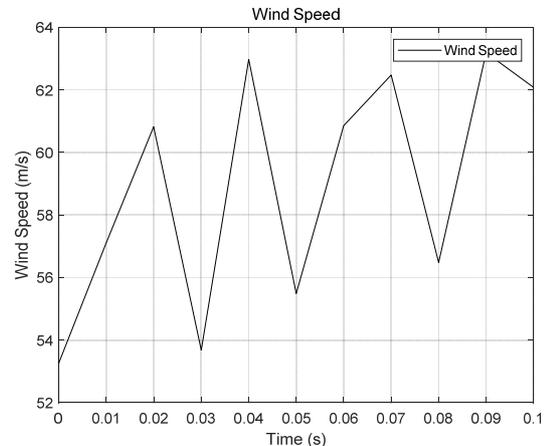


Fig. 5. Example of randomly generated wind speed data

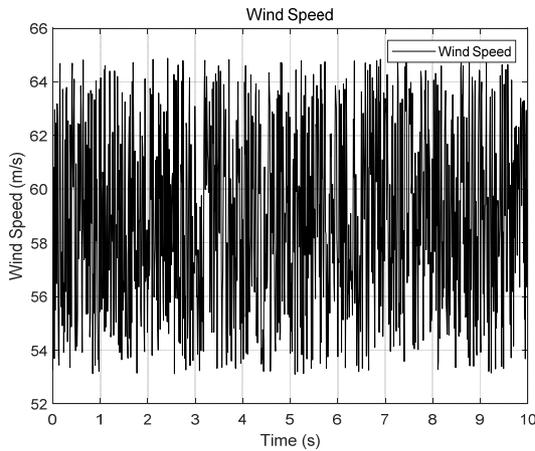


Fig. 6. Dynamic wind speed data $v'(t)$

리고 시뮬레이션에 사용된 데이터는 Fig. 6에 나타내었다. 태풍 블라벤은 2000년 이후 국내로 북상한 태풍 중 가장 강한 태풍이며, 2003년 태풍 매미 이후 관측된 태풍 중 가장 빠른 최대 순간 풍속을 보유한 태풍이므로 이번 연구의 극한 환경으로 설정하였다^[10].

본 연구에서는 Fig. 6의 변동 풍속 데이터를 사용하여 극한 환경에서의 송전선의 갈러핑 현상을 시뮬레이션으로 분석하며, 식 (4)를 사용하여 풍압 하중을 계산하고, 이를 구조해석의 하중 조건으로 적용한다.

2.3 갈러핑 현상 시뮬레이션

본 연구에서는 갈러핑 현상 시뮬레이션을 통해 송전선의 최대 이동 변위와 송전선에 가해지는 하중을 분석한다. 갈러핑 현상 시뮬레이션 연구^[11]에 따르면, 물체가 움직이고 있는 상태에서 순간적으로 작용하는 공기력은 정상 상태에서 작용하는 하중과 물체에 부는 바람의 상대속도에 의해 발생하는 영각으로 작용하는 힘의 합으로 표현할 수 있다. 이러한 송전선의 갈러핑 현상은 준 정상 이론으로 설명될 수 있으며, 운동 방정식은 식 (5)와 같이 표현된다^[6].

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -\frac{1}{2}\rho U^2 D \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \frac{\dot{y}}{U} \quad (5)$$

식 (5)의 좌변에서 m 은 송전선의 질량 $[kg]$, k 는 송전선의 스프링 계수, c 는 송전선의 감쇠계수이며 y 는 송전선의 수직 방향 변위 $[m]$, \dot{y} 는 송전선의 수직 방향 이

동속도 $[m/s]$, \ddot{y} 는 송전선의 수직 방향 가속도 $[m/s^2]$ 이다. 우변의 ρ 는 공기밀도 $[kg/m^3]$, U 는 Fig. 4의 풍속 데이터, α 는 영각 $[^\circ]$, D 는 154 kV 송전선의 지름 $[mm]$ 이며 C_L 은 송전선의 양력계수, C_D 는 송전선의 항력 계수이다.

식 (6)은 Den Hartog 조건을 나타내며, Den Hartog 값이 음수가 되면 송전선의 진동이 증폭하여 갈러핑 현상이 발생한다. Fig. 6의 풍속 데이터 조건에서 갈러핑 현상이 발생할 때 송전선의 최대 이동 변위와 송전선에 가해지는 하중을 계산한다^[6].

$$\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \quad (6)$$

2.4 송전탑 구조해석 시뮬레이션

본 연구에서는 일반적인 상황과 극한 상황, 두 가지 상황에 대해서 송전탑의 구조해석 결과를 비교한다. 첫 번째는 일반적인 상황 조건으로, 가공 송전용 철탑 설계기준에 따라 식 (3)로 계산한 풍압 하중을 고려한다. 두 번째는 극한 상황 조건으로, Fig. 6의 풍속과 식 (4)로 계산한 풍압 하중과 갈러핑 현상에 의해 송전선이 받는 하중을 같이 계산한다. 또한 실제 송전탑의 변형 및 응력과 같은 송전탑의 구조물 응답 특성을 반영하기 위해, 본 연구에서는 Fig. 7과 Table 4에 제시된 입력 하

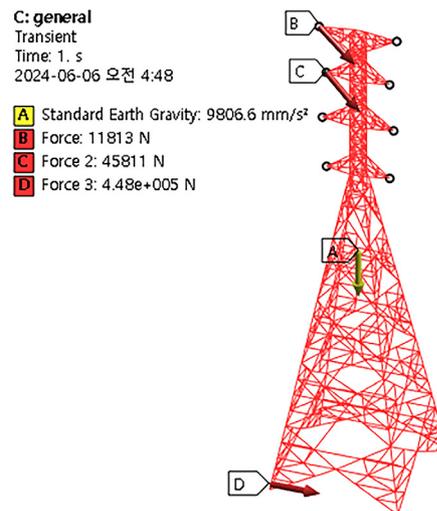


Fig. 7. Simulation conditions for structural analysis of transmission towers

Table 4. Boundary condition of structural analysis

Boundary Condition	Load[N]	
	Normal	Extreme
Self Weight of Transmission Tower	350,520	
Wind Load on Overhead Ground Wires	11,813	135,510
Wind Load on Transmission Lines	45,811	298,570
Lateral Wind Load on Transmission Tower	448,000	2,737,300

중 조건을 비선형 동적해석을 사용하여 시뮬레이션한다. 구조해석 시뮬레이션의 경계 조건에서 각 송전탑 암이 받는 풍압 하중은 집중 질량으로 한 점에 설정하며, 송전탑의 기초부는 고정 조건(Fixed Support)으로 설정한다.

일반 상황 조건과 극한 상황 조건의 송전탑 구조해석 시뮬레이션 결과를 다음 3가지에 대하여 비교 분석하여 송전탑의 안정성을 평가한다.

- 1) 송전탑의 최대 변형량
- 2) 송전탑 암의 압축 하중과 인장 하중
- 3) 송전탑의 안전율 평가

3. 연구 결과

3.1 갈러핑 현상 시뮬레이션

극한 환경에서 발생한 풍속에 의해 갈러핑 현상이 발생한 경우, 송전선 최대 이동 변위는 송전선의 이도가 가장 큰 중심부에서 수직 방향으로 6.28 m로 나타났고, 이때 송전선에 가해지는 하중의 크기는 송전선의 중심부에서 수직 방향으로 약 297,350 N으로 나타났다. Table 1에 제시된 송전선 간의 표준 이격거리는 6.1 m로, 갈러핑 현상이 발생할 때 송전선의 접촉을 방지하기에 적합하지 않음을 확인하였다.

본 연구에서는 극한 환경에서의 풍속 변화에 대응하기 위해 기존 이격거리의 문제점을 개선한 새로운 이격거리 기준을 Fig. 8과 Table 5에 제안한다. Fig. 7의 A', B', C', D'는 송전선과 송전탑의 접촉 방지를 위한 수평 이격거리이며, a', b', c'는 송전 선간의 접촉 방지를 위

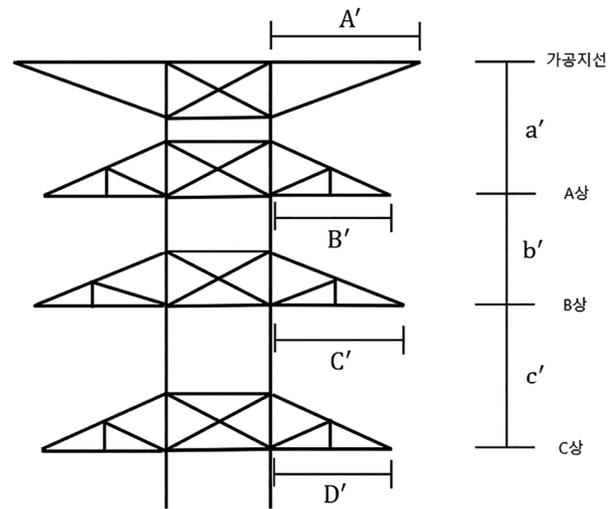


Fig. 8. Improved clearance distance for 154 kV transmission towers

Table 5. Improved clearance distance for 154 kV transmission towers

Standard	Standard [mm]	Improved [mm]
A'	4,100	4,100
B'	3,200	3,200
C'	3,700	3,700
D'	3,200	3,200
a'	2,500	3,000
b'	6,100	6,600
c'	6,100	6,600

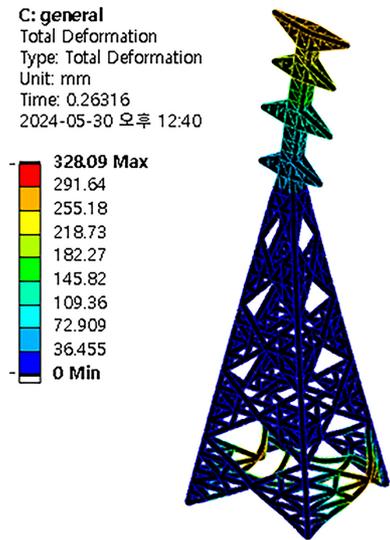
한 수직 이격거리를 나타낸다. Table 5에서는 본 논문에서 새롭게 제안한 수평, 수직 이격거리와 표준 이격거리를 비교하여 나타냈다.

3.2 송전탑 구조해석 시뮬레이션 결과

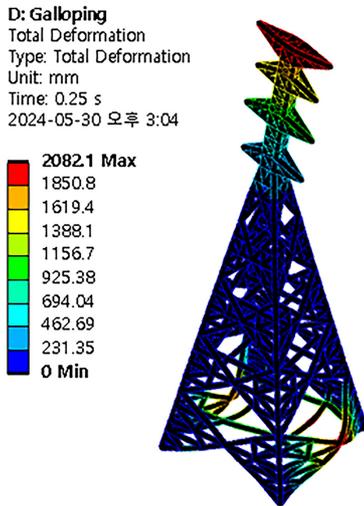
3.2.1 송전탑 최대 변형량 해석 결과

최대 변형량 해석은 풍압 하중이 가해질 때 송전탑의 최대 변형 길이와 방향을 확인할 수 있다. 송전탑의 최대 변형량 해석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. (a)는 일반 상황 조건이며 (b)는 극한 상황 조건을 나타낸다.

일반 상황과 극한 상황에서 송전탑의 최대 변형량은 모두 가공지선이 연결되는 암, 즉 송전탑의 최고 높이에서 발생하였다. Fig. 10과 같이 구조물을 단면에서 볼 때 높이가 증가하면 풍압 하중의 크기도 증가하며, 구



(a) Normal condition



(b) Extreme condition

Fig. 9. Analysis results of maximum deformation in transmission towers

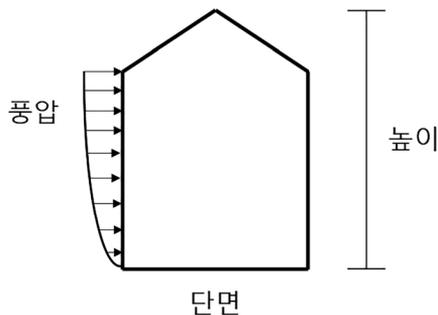
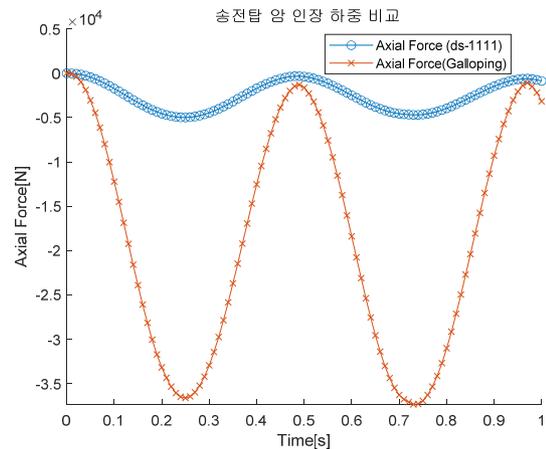


Fig. 10. Wind pressure distribution across building height in cross-section

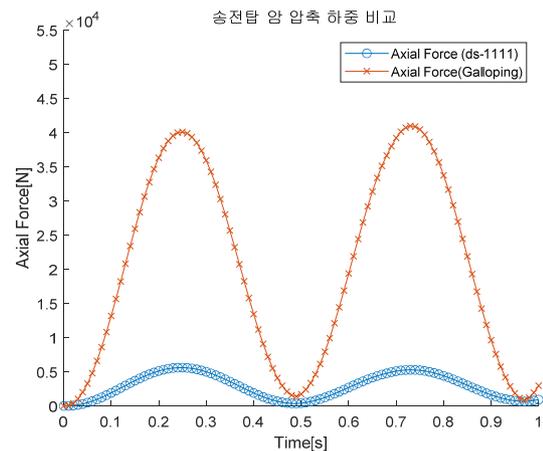
조물의 높이가 최대인 부분에서 풍압 하중의 크기도 최대가 된다^[12]. 송전탑 암의 최대 변형이 최대 높이에서 발생하는 원인은 가공지선이 연결되는 암 부분에서 풍압 하중의 크기가 가장 크기 때문이다. 일반 상황 조건에서 송전탑의 최대 변형량은 328.09 mm이며, 극한 상황 조건에서 송전탑의 최대 변형량은 2082.1 mm로 약 6.34배 증가하였다. 이는 동적 성분을 가지는 풍속이 송전탑의 변형에 큰 영향을 미쳤음을 보여준다.

3.2.2 송전탑 암(Arm) 축 하중 해석 결과

송전탑 암의 축 하중 해석 결과를 Fig. 11과 Table 6에 나타내었다. 송전탑 암이 받는 축 방향 하중은 철탑 부재가 압축력을 받는 압축 하중과 인장력을 받는 인장 하중으로 구분할 수 있다. Fig. 11(a)는 송전탑 암이 받



(a) Tensile strength



(b) Compression strength

Fig. 11. Analysis results of axial load on transmission tower arms

Table 6. Analysis results of axial load on transmission tower arms

Load	Compression [N]	Tensile [N]
Normal	5,618	4,984
Extreme	42,097	37,360

는 인장 하중을, (b)는 압축 하중을 나타냈다.

Table 6와 같이 극한 상황에서 송전탑 암이 받는 압축 하중과 인장 하중은 일반 상황보다 약 7.5배 높았다. 인장 하중은 부재의 좌굴에 영향을 주지 않으나, 압축 하중은 좌굴을 발생시킬 수 있다. 식 (7)은 오일러 좌굴 하중 공식이며, 식 (7)에 따라 구한 좌굴 하중은 값은 Table 7에 나타냈다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (7)$$

여기서 P_{cr} 은 허용 좌굴 하중[N]이며, E 는 탄성계수 [MPa], I 는 부재의 단면 2차 모멘트[m⁴], K 는 좌굴 길이 계수, L 은 부재의 길이[m]이다. 송전탑 암의 축 하중 해석에서 취약 부위는 가공지선 암이다. Table 2와 3에서 탄성계수는 200[GPa], 부재의 단면 2차 모멘트는 131.533 · 10⁻⁸[m⁴]이다. 가공지선 암의 총길이는 4,100[mm]이며 K 는 1.0으로 계산한다. 식 (7)을 사용하여 구한 송전탑 암의 허용 좌굴 하중은 154.45[kN]이다. 일반 상황과 극한 상황에서 허용 좌굴 하중에 대한 안전율을 구한 결과, 극한 상황에서 받는 압축 하중의 안전율은 3.66이며 일반 상황의 안전율은 27.48이다. 극한 상황 조건에서 압축 하중이 일반 상황보다 7.5배 높으므로, 극한 상황 조건에서 송전탑 암이 좌굴에 의한 파손될 가능성이 일반 상황에 비하여 높은 것으로 분석할 수 있다.

Table 7. Safety factor results for compressive load on transmission tower arms

Condition	Normal	Extreme
Allowable Buckling Load	154.45[kN]	
Safety Factor	27.48	3.66

3.2.3 송전탑 복합 응력 해석 결과

복합 응력은 송전탑 축 응력과 휨 응력을 고려하여 계산한 힘이다. 복합 응력 해석은 송전탑 전체의 복합 응력의 평균값을 통하여 안전율을 평가할 수 있다. 평균 응력 계산 방법은 식 (8)^[8]과 같다.

$$\sigma_{combined} = \sigma_{Axial} + \sigma_{Bending} \quad (8)$$

σ_{Axial} 은 축 응력[MPa]이며 $\sigma_{Bending}$ 은 휨 응력[MPa]이다. 송전탑의 복합 응력 해석 결과를 Fig. 12와 Table 8에 나타내었다.

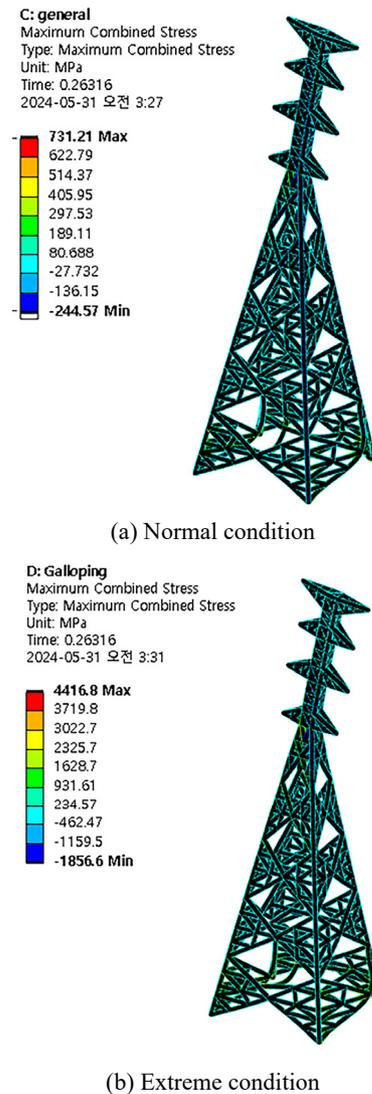


Fig. 12. Analysis results of maximum combined stress in transmission towers

Table 8. Yield strength of members and safety factor of transmission towers

	Normal	Exteme
Combined Stress [MPa]	80.668	234.57
Safety Factor	3.09	1.07
Yield Strength of SS400 [MPa]	250	

복합 응력은 송전탑 구조물 전체의 안정성을 평가하는 것이 목표이므로 송전탑 구조물 전체의 평균 응력 값을 사용하였다. 부재의 항복 강도와 복합 응력의 평균값을 사용한 안전율의 계산 방법은 식 (9)과 같다.

$$S = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma_{combined}} \quad (9)$$

여기서 S 는 안전율이며, σ_{allow} 는 부재의 항복 강도 [MPa], $\sigma_{combined}$ 는 최대 결합의 평균 응력 [MPa]을 나타낸다. 항복 강도는 부재가 소성변형이 일어나는 한계 강도로, 항복 강도를 초과하는 응력은 부재의 소성변형과 2차 비선형 변형을 발생시켜 부재의 내구성과 안정성을 감소시킨다^[13]. 극한 상황 조건의 안전율은 일반 상황 조건의 안전율보다 65.81 % 감소한 결과를 확인하였다. 극한 상황에서의 송전탑의 최대 변형량, 송전탑이 받는 축 하중, 송전탑의 복합 응력의 크기는 일반 상황에 비하여 증가했으며, 안전율은 감소하였다. 극한 상황에서도 송전탑의 안정성을 확보하기 위해서는 설계 과정에서 극한 상황을 반영하는 설계기준이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 엔시스 2024 R1을 사용하여 1,108개의 보 요소로 구성된 송전탑 구조해석 모델을 구성하고, 태풍 블라벤의 풍속 데이터를 반영한 동적 성분 풍속 데이터를 사용하여 갈러핑 현상을 시뮬레이션하였다. 이를 통해 송전선의 최대 이동 변위와 송전선이 받는 하중을 확인하였다. 또한, 송전탑의 최대 변형량, 송전탑 압의 축 하중, 복합 응력 해석에 대한 구조해석 시뮬레이션 결과를 표준 설계 기준과 극한 환경 기준에 대하여 비교하여 이상 기후 조건을 반영하는 설계기준

의 필요성을 확인하였다. 본 연구에서 확인한 결과는 다음과 같다.

- 1) 태풍 블라벤의 풍속 데이터를 적용한 갈러핑 현상 시뮬레이션에서 송전선의 수직 방향 최대 이동 변위는 6.28 m로 나타났다. 이는 현재 사용하는 표준 이격거리 6.1 m보다 크므로 표준 이격거리가 송전선의 접촉을 방지하기에 부족한 것으로 판단된다. 새로운 이격거리는 기존 이격거리보다 0.5 m를 더 증가시켰다.
- 2) 극한 환경 설계 기준 송전탑의 최대 변형량은 표준 설계 기준보다 6.34배 크게 나타났다. 이는 동적 성분을 포함한 풍속이 송전탑의 변형에 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다.
- 3) 극한 환경 설계 기준 송전탑 압의 축 하중은 표준 설계 기준보다 7.5배 크게 나타났다. 이는 극한 환경 조건에서 송전탑 압이 좌굴에 의한 파괴가 일어날 가능성이 더 높음을 확인하였다.
- 4) 극한 환경 설계 기준 송전탑의 복합 응력 해석 결과, 송전탑의 안전율이 65.81 % 감소한 것으로 나타났다. 이는 표준 설계 기준이 이상 기후 현상을 충분히 고려하지 못하고 있음을 보여준다.

극한 상황에서도 송전탑의 안정성을 확보하기 위해서는 설계 과정에서 극한 상황을 반영하는 설계기준이 필요하다. 본 연구 결과는 이상 기후 조건을 반영한 새로운 설계기준의 필요성을 강조하며, 이는 송전탑의 안정성과 내구성을 향상하는 데 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌(References)

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy (2023) *The 11th Basic Plan of Long-Term Electricity Supply and Demand*, MOTIE Notice No. 2023-036, MOTIE (in Korean).
- [2] Korea Electric Power Corporation (2023) *The 10th Long-term Power Transmission and Substation Facility Plan(2022~2036)*, KEPCO (in Korean).
- [3] Park, J.U., Shin.T.W., Choi, J.S., Choi, H.Y., and Min, B.W. (2010) 345kV Overhead Transmission Line Collapse Analysis and Countermeasures, *The*

- Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, KIEE, Vol.59, No.3, pp.531-535 (in Korean).
- [4] Korea Electric Power Corporation (2004) *Design Standards for Overhead Transmission Towers, DS-1111*, KEPCO (in Korean).
- [5] Faheid, D., Afshar, P., Kaiser, C., Sutton, J., Gilbert, M., and Ward, T. (2024) At Least 7 Dead after Hurricane-Force Winds Pound Houston as Power Outages Persist Amid Rising Temperatures, <https://www.cnn.com/2024/05/17/weather/flooding-south-storms-houston-friday>
- [6] Lee, D., Goo, J., Park, S., and Kim, D. (2017) Aerodynamic Characteristics and Galloping Possibility of Ice Accreted Transmission Conductors by Wind Tunnel Tests, *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, Korea Electric Power Corporation, Vol.3, No.2, pp.79-88 (in Korean).
- [7] Ysaii, H., Marukawa, H., Momomura, Y., and Ohkuma, T. (1999) Analytical Study on Wind-Induced Vibration of Power Transmission Towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, Vol.83, No.1-3, pp.431-441.
- [8] Chang, J.W., Kim, S.J., Park, J.S., and Kang, Y.J. (2007) Suggestion of Reasonable Analysis Model for Steel Transmission Tower Based on KEPCO Design Specification, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.4, pp.367-381 (in Korean).
- [9] Jung, H.-J., Shin, D.-S., Moon, B.-W., Park, J.-H., Lee, S.-K., and Min, K.-W. (2006) Static, Dynamic and Buckling Analyses of a Power Transmission Tower under Wind Load, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.19, No.4, pp.369-374 (in Korean).
- [10] Korea Meteorological Administration National Typhoon Center (2013) *2012 Typhoon Analysis Report*, NTC Technical Note 2013-7, KMA NTC (in Korean).
- [11] Oh, Y.J., Jun, C.W., Sohn, J.H., and Byun, G.S. (2019) Galloping Simulation of Plural Spans of the Power Transmission Line for Load Design of Pylon, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, KSPE, Vol.36, No.6, pp.559-565 (in Korean).
- [12] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Proposed Complete Amendment of the Building Structure Standards*, MOLIT Notice No. 2016-317, MOLIT (in Korean).
- [13] Kim, W.B., Choi, B.J., and Ahn, J.K. (2008) Development of Nonlinear Analysis Technic to Determine the Ultimate Load in Electric Transmission Tower, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.3, pp.389-398 (in Korean).

요약: 최근 전 세계적으로 발생한 강력한 태풍과 토네이도 같은 이상 기후로 인한 송전탑 붕괴 사례가 증가하고 있다. 이에 따라, 극한 환경에서의 송전탑의 안정성을 확보하기 위해, Ansys 2024 R1을 사용하여 1,108개의 보 요소로 구성된 송전탑 구조 해석 모델을 구축하고, 변동 풍속 데이터를 활용하여 갈로핑 현상을 시뮬레이션하였다. 갈로핑 현상 시뮬레이션 결과, 송전선의 최대 이동 변위는 6.28 m로, 현재 사용되는 표준 이격거리 기준이 적합하지 않음을 확인하였다. 또한 극한 환경에서 송전탑의 최대 변형량은 표준 설계 기준 대비 약 6.34배 증가했고, 축 하중은 약 7.5배 증가했으며, 안전율은 65.81 % 감소하였다. 이를 통해 극한 환경에서도 송전탑의 구조적 안정성을 높이기 위한 새로운 설계 기준의 필요성을 확인했으며, 본 논문에서 새로 제안한 구조해석 및 안정성 평가 방법은 앞으로의 송전탑 설계의 내구성과 안정성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어: 송전탑, 송전선, 안정성, 극한 상황 조건, 상간 이격거리, 동적 성분 풍속 데이터
