

풍하중을 받는 송전 시스템의 동적해석

Dynamic Analysis of Electrical Power Transmission System under Wind Load

정 형 조* · 김 영 훈** · 박 지 훈*** · 민 경 원****

Jung, Hyung-Jo · Kim, Young-Hoon · Park, Ji-Hun · Min, Kyung-Won

ABSTRACT

Dynamic analysis of the electrical transmission system including transmission towers and cables is carried out by a general purpose structural analysis computer program for examining the wind-resistance of the system. The spectral representation method is introduced to generate dynamic wind loads by using the Kaimal's spectrum and the measured wind velocities from wind tunnel tests, respectively. The numerical simulation results show that the responses in the case of the measured wind velocities is slightly larger than those in the case of the code.

Keywords: dynamic analysis, power transmission system, wind load, spectral representation method

1. 서 론

2003년 태풍 매미가 경상남도 남해안을 강타했을 때 송전철탑 여러 기가 심각한 손상을 입어 전력공급이 일시적으로 중단되는 사고가 발생하였다. 이로 인해, 지역 주민들이 생활에 불편을 겪은 것은 물론이고 공장 가동 중단으로 인해 막대한 경제적 피해도 야기되었다. 이러한 사례는 태풍이나 국지적인 돌풍과 같은 자연 재해에 대한 국가 주요 사회기반 시설물 중 하나인 송전 시스템의 안전성 확보가 매우 중요하다는 것을 보여주고 있다. 송전 시스템의 심각한 손상 및 붕괴를 방지하기 위한 적절한 대책을 수립하기 위해서는 송전 시스템을 이루는 송전철탑 및 송전선과 같은 구조물에 대한 자세한 해석 및 분석이 필수적이다. 하지만, 아직까지 구조 공학 분야에서 동적 하중을 받는 송전 시스템에 대한 연구는 매우 미미한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 연구 배경을 바탕으로 송전 시스템에 대한 동적해석을 통해 송전 시스템의 풍응답 특성을 파악하고자 한다. 실제 국내에서 시공되어 공용 중에 있는 송전 시스템에 대한 자료를 입수하여 송전 철탑과 송전선을 모두 고려한 유한요소 모델을 구성하였고, 변동 풍속 생성에 널리 사용되고 있는 Kaimal's spectrum과 지난 2003년 태풍 매미 때 실제로 송전철탑이 붕괴된 지형을 축소 제작한 풍동실험을 통해 계측된 바람의 동적 성분을 이용하여 동적 풍하중을 생성하였다. 송전선의 장력 및 철탑과 송전선의 연결 형태를 모두 고려하였다. 범용 구조해석 프로그램을 이용하여 선형 시간이력해석을 수행하였고, 결과를 분석하여 풍하중의 동적 성분이 송전 철탑의 응답에 미치는 영향을 검토하였다.

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 E-mail: hjung@sejong.ac.kr

*** 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

*** 단국대학교 건축공학과 연구전임강사

**** 정회원 · 단국대학교 건축공학과 부교수

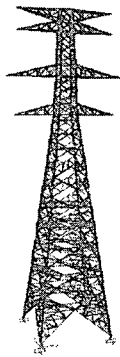
2. 동적 해석

2.1. 해석 대상 구조물

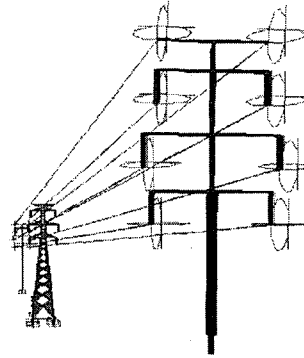
본 연구에서 고려한 송전전압 345 kV급 송전 시스템은 높이 70 m이며 4층의 첩탑암을 가진 송전첩탑 본체와 낙뢰로부터 보호하기 위한 가공지선이 맨 위층 첩탑암에 지나가고 나머지 3층의 첩탑암 부분에는 각각 한 쌍의 송전선이 지나가는 형태로 구성되어 있다. 또한, 송전첩탑 본체는 4면 동형의 구성으로 되어있는 사각첩탑이다.

송전첩탑 본체의 거동을 정확하게 구현할 수 있도록 먼저 그림 1(a)와 같이 3차원 유한요소 모델을 구성하였다. 해석 모델의 총 절점수는 608 개이고, 모든 부재는 실제부재의 단면을 가진 1,716개의 frame 요소로 구성하였다. 이음부의 거셋 플레이트, 볼트, 엘리베이터, 대피소 등은 해석 모델에서 제외시켰다. 주주재 및 복재의 볼트 이음부위는 강결되어 있다고 가정하였으며, 지점부는 첩탑기초인 콘크리트 구조물이 지반과 함께 거동하는 것으로 가정하여 고정 지점을 사용하였다. 이렇게 구성된 송전첩탑 모델의 총 자유도 수는 3,624 개다.

본 연구에서는 송전첩탑 본체에 가공지선 및 송전선을 포함한 가섬선이 연결되어 있는 경우에 대해서도 동적해석을 수행하였다. 이를 위해, 그림 1(b)와 같이 3개의 송전첩탑에 가섬선이 연결되어 있는 해석 모델을 고려하였다. 가운데 송전첩탑 본체는 그림 1(a)와 동일한 모델을 사용하였고, 양 쪽 송전첩탑 본체는 같은 강성을 가진 보 (beam) 요소로 간단히 모델링 하였다. 송전선이 첩탑에 연결된 형태에 따라 현수형과 내장형으로 나누어 모델링하였으며, 현수형의 경우에는 총절점수 1,150개이고, 모든 부재는 2,272개의 보 요소로 구성된 반면에, 내장형의 경우에는 총절점수 1,156개에 보 요소 2,278개로 모델링 되었다



(a) 송전첩탑 3차원 해석 모델



(b) 가섬선을 고려한 해석 모델 (현수형)

그림 1. 송전 시스템 해석 모델

2.2. 동적 풍하중

전체 풍하중은 다음 식과 같이 정적인 성분에 동적인 성분을 더한 것이다.

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot \overline{V^2} + \rho \cdot C \cdot A \cdot \overline{V} \cdot v(t) \quad (1)$$

여기서, 첫 번째 항은 평균속도 \overline{V} 에 의한 풍하중이 되고 이러한 풍하중에 의한 구조물의 응답은 정적해석을 통해 얻을 수 있다. 그리고, 두 번째 항은 풍속의 변동 성분 $v(t)$ 에 의한 풍하중이 되고, 이러한 변동 성분에 의한 구조물의 응답은 동적해석을 통해 얻어진다. 위 식에서는 변동 성분 $v^2(t)$ 에 의한 풍하중 성분은 상대적으로 작은 값이기 때문에 생략하였다. 여기서, 속도의 평균값 \overline{V} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{V} = \alpha \cdot V_{c10}, \quad V_{c10} = 43.7 [m/s] \quad (2)$$

식 (2)에서, 속도에 대한 상공체증계수는 일본 송전용 지지물 설계 표준 (일본전기학회 1979)에 따르면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \left(\frac{h}{10}\right)^{\frac{1}{8}} \quad (3)$$

본 연구에서는 Shinozuka가 개발한 spectral representation method를 이용하여 변동성분을 생성하였고 (Li et al. 2004, Cao et al. 2000), 이 풍속 변동성분 값과 식 (1)의 두 번째 항을 이용하여 동적 풍하중 성분을 계산하였다. 또한, Kaimal's spectrum을 이용하여 변동성분을 생성시키는 경우와 2003년 태풍 매미 때 실제로 송전철탑이 붕괴된 지형을 축소 제작하고 풍동실험 수행하여 계측된 자료를 이용하는 경우에 대해서 변동 풍하중을 각각 구하였다.

2.2.1. Kaimal's spectrum을 이용한 변동풍하중

Kaimal's spectrum 식을 이용하여 높이에 따른 파워스펙트럼밀도(power spectral density)를 생성한 후, 이를 이용하여 변동성분을 생성하였다 (Cao et al. 2000).

$$\frac{nS_v(z)}{U_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad \text{where } f = \frac{nz}{U(z)}, \quad U_* = \frac{KU(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \quad K=0.4 \quad (4)$$

여기서 z 는 높이(m), z_0 는 ground roughness이며 연구에서 사용한 값은 0.4 m이다. $U(z)$ 는 높이 z 에서의 평균 풍속을 나타내며, 본 연구에서는 철탑설계기준 (한국전력공사 2004)의 값을 이용하였다.

Spectral representation method를 이용하여 생성하는 풍속의 변동성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_j(t) = \sqrt{2(\Delta\omega)} \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N \sqrt{S(\omega_{ml})} G_{jm}(\omega_{ml}) \cos(\omega_{ml}t + \phi_{ml}), \quad j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

여기서 $S(\omega_{ml})$, $G_{jm}(\omega_{ml})$ 및 ϕ_{ml} 는 풍속의 변동성분에 대한 파워스펙트럼밀도와 관련된 값들이며 자세한 내용은 (Cao et al. 2000)을 참조하기 바란다.

높이 70m에서 spectral representation method를 이용하여 생성된 변동 풍속의 파워스펙트럼밀도와 Kaimal's spectrum의 파워스펙트럼밀도를 비교하면 그림 2와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이, spectral representation method를 통해 생성된 풍속의 변동성분은 Kaimal's spectrum과 주파수 성분이 매우 비슷하였다. 즉, spectral representation method를 통해 원하는 풍속 변동성분을 생성할 수 있었다.

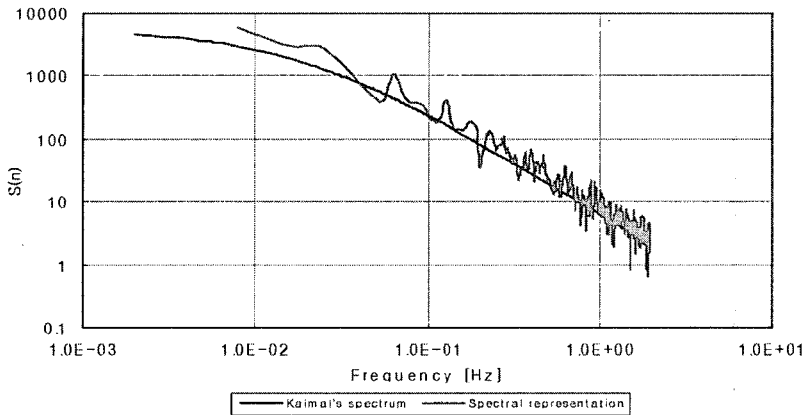


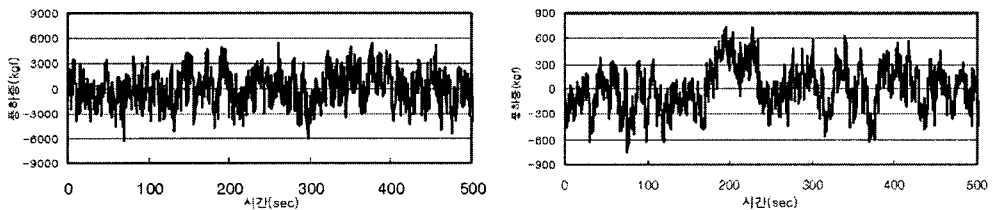
그림 2. 높이 70 m에서 풍속 변동성분의 파워스펙트럼밀도 비교

다음 단계는 생성된 풍속 변동성분을 아래의 식에 대입하여, 동적 해석에 필요한 동적 풍하중을 생성한다.

$$P_{\text{turbulence}}(t) = \rho \cdot C \cdot A \cdot \overline{V} \cdot v(t) \quad (6)$$

여기서 ρ 는 공기 밀도(=0.125kgf.s/m⁴), C 는 풍력계수, 그리고 A 는 수평 면적을 나타낸다.

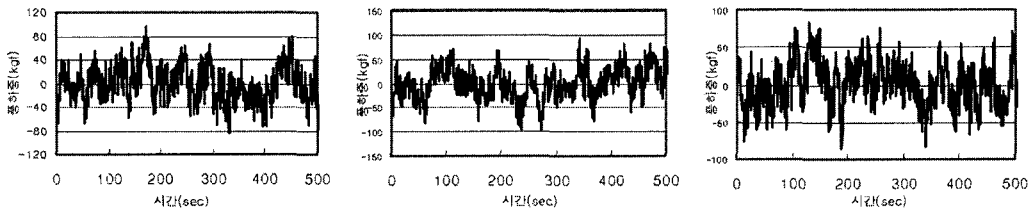
식 (6)을 통해 계산된 동적 풍하중을 일부 제시하면 그림 3, 4와 같다.



(a) 11.2 m

(b) 70 m

그림 3. 높이에 따른 풍하중의 동적 변동성분



(a) 0 m (b) 30 m (c) 600 m

그림 4. 높이 70 m에서 가섭선 위치에 따른 풍하중의 동적 변동성분

2.2.2. 계측풍속을 이용한 변동성분

앞 절에서는 Kaimal's spectrum의 파워스펙트럼밀도를 이용하여 풍속의 변동성분을 생성하는 방법을 소개하였다. 이번 절에서는 풍동 실험을 통해 직접 계측된 풍속의 파워스펙트럼밀도를 이용하여 동적 해석을 수행하기 위해, spectral representation method를 수행하였다. 높이 70m 에서의 계측 풍속과 spectral representation method를 이용하여 생성된 풍속과의 파워스펙트럼밀도를 비교하면 그림 5와 같이 나타난다.

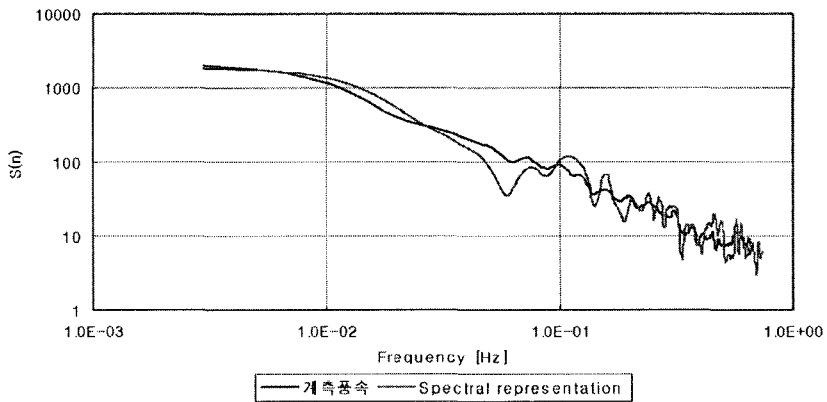
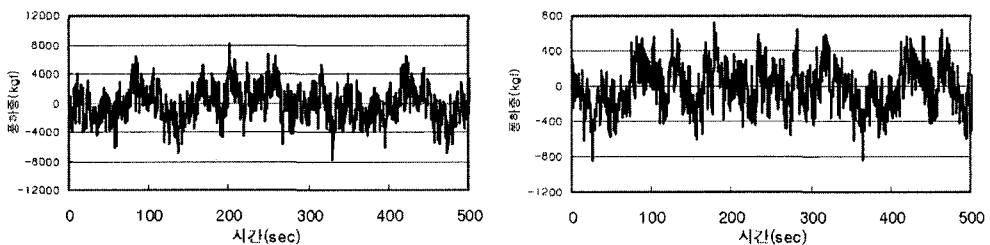


그림 5. 높이 70m 에서의 풍속의 파워스펙트럼밀도

앞 절과 마찬가지로 식 (6)을 통해 계산된 동적 풍하중을 일부 제시하면 그림 6, 7과 같다.



(a) 11.2 m (b) 70 m

그림 6. 높이에 따른 풍하중의 동적 변동성분

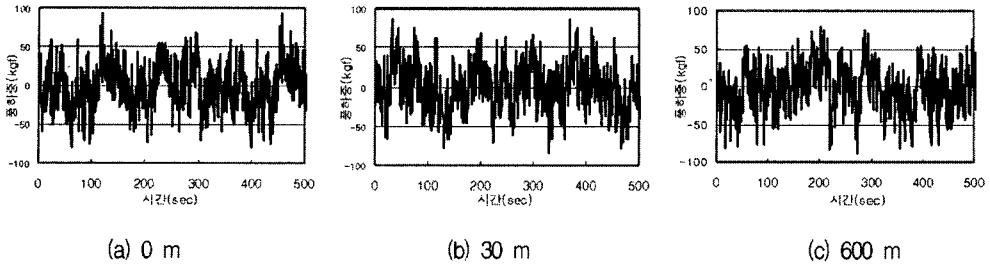


그림 7. 높이 70 m에서 가선선 위치에 따른 풍하중의 동적 변동성분

2.3. 변동 풍하중 재하

동적해석에서는 생성한 변동 풍하중을 가선선을 가설한 송전철탐에 각 높이에 따른 13개의 변동 풍하중을 철탐과 인접타워에 재하 시키고 가선선 방향으로 30m 간격으로 21개의 변동 풍하중을 각각의 가선선에 재하 시켜서 해석을 수행하였다.

3. 동적해석 결과

Kaimal's spectrum과 계측 풍속을 이용한 생성 풍하중을 외부 동적하중으로 고려하여 해석을 수행한 결과를 비교하였다. 변동 풍하중을 작용시켰을 때, 송전철탐 구조물에서 가장 큰 축력을 받는 주주재의 하단부, 즉 기초 정부에 발생하는 최대인장력 및 압축력은 아래 표 1과 같다. 표에서 알 수 있듯이, 계측 풍속의 경우 주주재의 단면력이 좀 더 크게 나타났는데, 이는 계측 풍속에 의해 생성된 동적 풍하중이 상대적으로 좀 더 크기 때문이다.

표 1. 변동 풍하중 작용 시 주주재 하단부의 최대인장력 및 압축력 비교 (tonf)

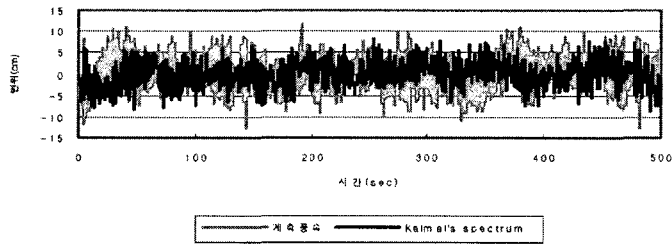
철탐형태	Kaimal's spectrum		계측 풍속	
	압축력	인장력	압축력	인장력
현수형	16.77	16.83	19.00	19.01
내장형	15.83	15.79	21.54	21.52

변동 풍하중을 작용시켰을 때, 송전철탐 구조물에서 가장 큰 변위를 가지는 철탐 최상단에 위치한 철탐암단부에서의 최대변위는 표 2와 같다. 부재의 단면력의 결과와 마찬가지로, 계측 풍속의 경우에 최대 변위가 좀 더 크게 나타났으나, 이는 동적 하중의 크기가 다르기 때문이다.

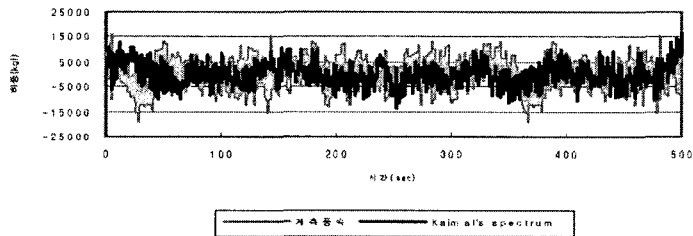
표 2. 철탐 상단에 있는 철탐암 단부에서의 최대변위 (cm)

생성조건	송전철탐 형태	
	현수형	내장형
Kaimal's spectrum	8.8	11.4
계측 풍속	12.8	15.9

그림 8은 현수형 송전 시스템의 경우에 철탑 상단에 위치한 철탑암 단부에서의 변위와 주주재 하단부에서의 축력의 시간이력곡선 (선로직각방향)을 보여주고 있다. 전체 해석 시간에 걸쳐서 계측 풍속의 결과가 Kaimal's spectrum의 결과보다 대체적으로 조금 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) 철탑 상단에 위치한 철탑암 단부의 변위

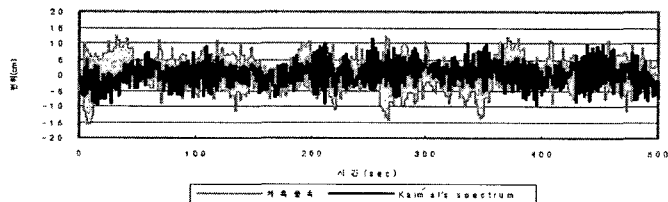


(b) 주주재 하단부의 축력

그림 8. 현수형 송전 시스템의 응답에 대한 시간이력곡선

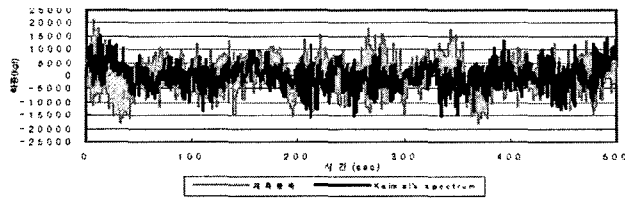
그림 9는 철탑 상단에 위치한 철탑암 단부에서의 변위와 주주재 하단부에서의 축력의 시간이력곡선 (선로 직각방향)을 보여주고 있다. 현수형 송전 시스템과 마찬가지로 전체 해석 시간에 걸쳐서 계측 풍속의 결과가 Kaimal's spectrum의 결과보다 조금 큰 값을 보이고 있다.

이상의 수치해석 결과를 정리해보면 다음과 같다. 철탑설계기준을 기반으로 만들어진 동적 풍하중에 비해 실제 계측 풍속으로부터 생성된 풍하중이 조금 더 컸으며, 이로 인해 동적 해석 결과도 계측 풍속의 경우가 조금 더 큰 응답을 보이고 있었다.



(a) 철탑 상단에 위치한 철탑암 단부의 변위

그림 9. 내장형 송전 시스템의 응답에 대한 시간이력곡선



(b) 주주재 하단부의 축력

그림 9. 내장형 송전 시스템의 응답에 대한 시간이력곡선 (계속)

4. 결론

본 논문에서는 국가 주요 사회기반 시설물 중 하나인 송전 시스템의 풍응답 특성을 파악하기 위해 송전 시스템에 대한 동적 해석을 수행하였다. 이를 위해, 송전 철타와 송전선을 모두 고려한 유한요소 모델을 구성하였고, 변동 풍속 생성에 널리 사용되고 있는 Kaimal's spectrum과 지난 2003년 태풍 매미 때 실제로 송전철타가 붕괴된 지형을 축소 제작한 풍동실험을 통해 계측된 바람의 동적 성분을 이용하여 동적 풍하중을 생성하였다. 범용 구조해석 프로그램을 이용하여 다양한 선형 시간이력해석을 수행하였고, 동적 해석 결과를 분석하여 풍하중의 동적 성분이 송전 철타의 응답에 미치는 영향을 검토하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술 연구 개발사업 (산학연C103A2000010-03A0200-010100)의 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 일본전기학회 (1979) 송전용 지지물 설계 표준, 일본전기학회 전기 규격 조사회 표준규격.
- 조강표, 홍성일, 조기성, 정형조 (2005) 산악지형효과를 고려한 송전철타의 내풍 안정성, 한국풍공학회 논문집, 9(2), pp.209-218.
- 한국전력공사 (2004) 가공송전선용 철타설계기준.
- 한국전력공사 (1996) 345KV 의정부 T/L NO.78 취약철타 교체공사용 설계도 "F2" TYPE.
- Li, Y., Liao, H., and Qiang, S. (2004) Simplifying the simulation of stochastic wind velocity fields for long cable-stayed bridges, *Computers and Structures*, 82, pp.1591-1598.
- Shinozuka, M., and Jan, C.M. (1972) Digital simulation of random processes and its applications, *Journal of Sound and Vibration*, 25(10), pp.111-128.
- Shinozuka, M. and Deodatis, G. (1991) Simulation of stochastic processes by spectral representation, *Applied Mechanics Review*, 44(4), pp.191-204.
- Ying, C., Xiang, H., and Zhou, Y. (2000) Simulation of stochastic wind velocity field on long-span bridges, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 126(1), pp.1-6.