

송전선 갤러핑 진동에 대한 동적 모델링 연구 Dynamic Modeling of Transmission Line Galloping Vibrations

곽문규† · 구재량* · 배용채*

Moon K. Kwak, Jae-Ryang Koo and Yong-Chae Bae

Key Words : Transmission Line(송전선), Galloping(갤러핑), Dynamic Modeling(동적 모델링)

ABSTRACT

This paper is concerned with the dynamic modeling of transmission line undergoing galloping vibrations. To this end, the kinetic and potential energies of a uniform wire vibrating in space are derived. The equations of motion suitable for numerical simulations are derived using the assumed mode method and Lagrange equation. The resulting equations of motion are expressed in matrix form. To cope with bundled transmission line, the spacer was modelled by a spring element. As a numerical example, a two-wire transmission line combined by spacers was considered. Natural vibration characteristics show that the in-plane vibrations of the transmission line appeared in low frequency range, which may lead to galloping.

1. 서 론

결빙된 송전선의 갤러핑은 전기가 도입된 1900 년도부터 문제점으로 제기되어 미국에서 연구가 시작되었다^(1,2). 갤러핑은 주로 겨울에 바람이 지속적으로 부는 날씨 가운데 송전선에 눈이 쌓이면서 착빙설로 인한 단면의 변화로 비행기 날개와 같은 양력이 발생해 과도한 진동이 발생하는 현상을 나타낸다. 갤러핑은 한 스펠당 한 개 또는 여러 개의 Standing Wave 형태로 단도체 또는 복도체 송전선에서 발생하는데, 주로 0.1 에서 1Hz 사이의 진동수로 스펠 이도(Sag)의 0.1 에서 1 배 이상의 진폭을 가지는 진동을 말한다. 국내 연구 보고 자료⁽³⁾에 의하면 겨울철에 수 cm 에서 12m 의 매우 큰 진폭이 발생하여 상간 단락을 발생시키고 순간 전압 강하가 일어난 것으로 알려졌다. 갤러핑에 대해서는 미국을 시작^(1,2,4,5)으로 일본⁽⁶⁾, 중국⁽⁷⁾ 등에서 연구가 수행되었다. 이에 비해 국내의 연구^(3,8,9)는 아직 미미한 단계이다. 최근에는 갤러핑이 발생하는 메커니

즘을 규명하기 위해 보다 정밀한 동적 모델의 유도가 이루어졌으며, 또한 갤러핑을 사전에 방지할 있는 장치의 개발도 이루어지고 있다. 그렇지만 아직도 갤러핑 문제에 대한 정확한 해석 모델의 유도는 Den Hartog⁽¹⁾의 초기 연구에 비해서 그렇게 뚜렷한 발전이 이루어지지 않고 있다. 그리고 갤러핑을 확실하게 방지할 수 있는 방법도 개발되었다고 말할 수 없다.

송전선의 갤러핑은 원래 원형이었던 송전선 단면이 눈이 결빙되면서 양력과 항력이 동시에 발생할 수 있는 Bluff Body 형태로 바뀌면서 바람과 송전선의 진동이 연동되어 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 갤러핑 현상을 규명하기 위해서는 공기역학적인 특성을 먼저 조사해야한다. 그러나 바람과 눈 모두 그 특성이 Random 이고 바람으로 인해 발생하는 공기력도 비정상(Unsteady) 상태이기 때문에 정확한 공기력을 해석적으로 계산하는 것도 어렵고 풍동 실험으로 추출하는 것도 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 갤러핑 동적 모델에 공기력을 포함시키기 위해서는 준정상(quasi-steady) 상태라는 가정을 도입한다. 이는 공력의 시간 변화를 무시한다는 가정인데, 따라서 진입각(Angle of Attack)의 변화에 따른 공기력의 변화는 무시한다는 가정이다. 사실상 이런 가정 없이는 공기력을 수치 모델에 포함

† 교신저자, 발표자; 정회원, 동국대학교 기계로봇에너지공학
학과 E-mail : kwakm@dongguk.edu

Tel : 02-2260-3705, Fax : 02-2263-9379

* 한국전력연구원

시킬 수 있는 방법은 현재 존재하지 않는다. 진입각에 따른 공력 계수들은 풍동실험을 통해 구하게 된다. 그러나 갤러핑을 유발하는 결빙상태의 송전선 단면에 대해서는 아직 정확하게 측정된 데이터가 없어서 임의로 정한 송전선 착설 단면에 대해 풍동 실험을 수행하고 그 결과를 갤러핑 예측 수치 모사에 사용하고 있다.

본 연구에서는 송전선의 갤러핑 진동을 예측하기 위해 먼저 송전선의 동적 모델링 방법을 연구하였다. 이를 위해 단도체 송전선에 대한 진동 모델을 먼저 유도하고 중간 스페이서가 장착된 경우의 복도체 송전선의 모델을 유도하였다. 수치계산을 위해 대표적인 송전선 물성치를 이용해 고유진동수와 고유진동모드를 계산하고 진동 특성을 조사하였다.

2. 송전선 동적 모델

2.1 단도체 모델링

먼저 Fig. 1과 같은 아래로 처진 송전선을 고려해 보자. 여기서 u, v, w 는 각 방향으로의 변위를 나타낸다. L 은 스패 간격, d 는 송전선 중간에서의 정적 처짐을 나타낸다.

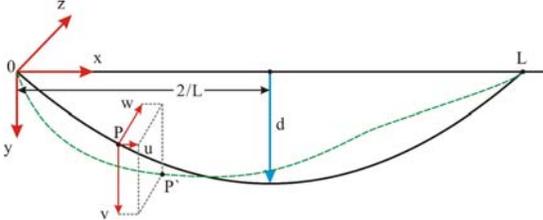


Figure 1 Coordinate system for transmission line

송전선의 처짐에 대해서는 이미 Irvine and Caughey⁽¹⁰⁾가 수행한 연구 결과가 있는데 다음 식으로 주어진다.

$$y = \frac{\rho AgL^2}{2T} \left[\left(\frac{x}{L} \right) - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서 ρ 는 송전선의 질량 밀도, A 는 단면적, g 는 중력가속도, T 는 장력을 나타낸다. 식 (1)을 사용하면 중앙에서의 이도는 다음과 같이 유도된다.

$$d = y \left(x = \frac{L}{2} \right) = \frac{\rho AgL^2}{8T} \quad (2)$$

현장에서는 이도를 측정한 후 이 식을 이용해 송전선의 장력을 계산한다.

위 그림으로 주어진 모델에 대해 동적 에너지와 위치에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$T_c = \frac{\rho A}{2} \int_0^L (\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) dx + \frac{\bar{I}_\phi}{2} \int_0^L \dot{\phi}^2 dx \quad (3)$$

$$V_c = \int_0^L \left(\frac{1}{2} AE \varepsilon^2 + \frac{1}{2} GJ \varepsilon_\phi^2 + T\varepsilon - \rho Agv \right) dx \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 비틀각을 나타내며, \bar{I}_ϕ 는 단위길 이당 비틀관성모멘트, E 는 영의 계수, G 는 전단계수, J 는 비틀강성을 나타낸다. 그리고 변형율은 다음 식으로 주어진다.

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{4d}{L} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 식 (3)과 (4)에 대입하고 해밀턴원리를 이용하면 편미분방정식 형태의 운동방정식을 유도할 수 있다. 그러나 편미분방정식 형태는 수치계산이 용이하지 않기 때문에 본 연구에서는 가정모드법(Assumed Mode Method)과 라그랑지 방정식을 사용하고자 한다. 가정모드법을 사용하여 각방향 변위와 비틀각을 다음과 같이 표현해 보자.

$$u = \Phi \mathbf{q}_u, v = \Phi \mathbf{q}_v, w = \Phi \mathbf{q}_w, \phi = \Phi \mathbf{q}_\phi \quad (7a-d)$$

여기서 $\mathbf{q}_u, \mathbf{q}_v, \mathbf{q}_w, \mathbf{q}_\phi$ 는 각 방향 일반변위 벡터로서 각각 $n \times 1$ 의 벡터를 나타낸다.

$$\Phi = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi x}{L} & \sin \frac{2\pi x}{L} & \dots & \sin \frac{n\pi x}{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

는 허용함수로서 $1 \times n$ 의 행렬을 나타낸다. n 은 허용함수의 개수를 나타낸다. 식 (7)을 식 (5)와 (6)에 대입하고 그 결과를 다시 식 (3)과 (4)에 대입하면 이산화된 형태의 운동에너지와 위치에너지가 다음과 같은 식으로 유도된다.

$$T_c = \frac{\rho AL}{2} (\dot{\mathbf{q}}_u^T \dot{\mathbf{q}}_u + \dot{\mathbf{q}}_v^T \dot{\mathbf{q}}_v + \dot{\mathbf{q}}_w^T \dot{\mathbf{q}}_w) + \frac{\bar{I}_\phi L}{2} \dot{\mathbf{q}}_\phi^T \dot{\mathbf{q}}_\phi \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
V_c &= \frac{1}{2} \left(\frac{AE+T}{L} \right) \mathbf{q}_u^T \mathbf{K} \mathbf{q}_u \\
&+ \frac{1}{2} \mathbf{q}_v^T \left(\frac{T}{L} \mathbf{K} + \frac{16AE\delta^2}{L} \mathbf{K}_{Evv} \right) \mathbf{q}_v \\
&+ \frac{1}{2} \left(\frac{T}{L} \right) \mathbf{q}_w^T \mathbf{K} \mathbf{q}_w + \frac{1}{2} \left(\frac{GJ}{L} \right) \mathbf{q}_\phi^T \mathbf{K} \mathbf{q}_\phi \\
&+ \left(\frac{4AE\delta}{L} \right) \mathbf{q}_u^T \mathbf{K}_{Euv} \mathbf{q}_v
\end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\delta = d/L$ 로 즉 이도율을 나타내며

$$\mathbf{K} = \int_0^1 \mathbf{\Phi}^T \mathbf{\Phi}' d\xi, \quad (11a)$$

$$\mathbf{K}_{Evv} = \int_0^1 (1-2\xi)^2 \mathbf{\Phi}^T \mathbf{\Phi}' d\xi \quad (11b)$$

$$\mathbf{K}_{Euv} = \int_0^1 (1-2\xi) \mathbf{\Phi}^T \mathbf{\Phi}' d\xi \quad (11c)$$

이다. 여기서 $\xi = x/L$ 로 무차원화된 위치를 나타낸다. 식 (10)을 유도하는 과정에서 중력가속도를 포함한 항은 정적처짐과 관련되어 소거되었다. 이는 송전선의 진동이 평형선인 정적 변형선을 기준으로 발생함을 의미한다. 식 (9)와 (10)을 라그랑지 방정식에 대입하면 다음과 같은 운동방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned}
\rho AL \ddot{\mathbf{q}}_u + \frac{(AE+T)}{L} \mathbf{K} \mathbf{q}_u \\
+ \frac{AE(4\delta)}{L} \mathbf{K}_{Evv} \mathbf{q}_v = \mathbf{Q}_u
\end{aligned} \quad (12a)$$

$$\begin{aligned}
\rho AL \ddot{\mathbf{q}}_v + \frac{AE(4\delta)}{L} \mathbf{K}_{Evv}^T \mathbf{q}_u \\
+ \left[\frac{T}{L} \mathbf{K} + \frac{AE}{L} (16\delta^2) \mathbf{K}_{Evv} \right] \mathbf{q}_v = \mathbf{Q}_v
\end{aligned} \quad (12b)$$

$$\rho AL \ddot{\mathbf{q}}_w + \frac{T}{L} \mathbf{K} \mathbf{q}_w = \mathbf{Q}_w \quad (12c)$$

$$\bar{I}_\phi L \ddot{\mathbf{q}}_\phi + \frac{GJ}{L} \mathbf{K} \mathbf{q}_\phi = \mathbf{Q}_\phi \quad (12d)$$

여기서 $\mathbf{Q}_u, \mathbf{Q}_v, \mathbf{Q}_w, \mathbf{Q}_\phi$ 는 각 방향 일반력 (Generalized Force)을 나타낸다. 갠러핑 진동의 경우 이 일반력들은 공력에 의한 힘들로 나타나게 된다. 위 식들을 행렬 형태의 하나의 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_t \mathbf{q} = \mathbf{Q} \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_u^T \quad \mathbf{q}_v^T \quad \mathbf{q}_w^T \quad \mathbf{q}_\phi^T]^T$ 이며

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} \rho AL \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \rho AL \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \rho AL \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \bar{I}_\phi L \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (14a)$$

$$\mathbf{K}_t = \begin{bmatrix} \frac{(AE+T)}{L} \mathbf{K} & \frac{AE(4\delta)}{L} \mathbf{K}_{Evv} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \frac{AE(4\delta)}{L} \mathbf{K}_{Evv}^T & \frac{T}{L} \mathbf{K} + \frac{AE}{L} (16\delta^2) \mathbf{K}_{Evv} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \frac{T}{L} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \frac{GJ}{L} \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad (14b)$$

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_u^T \quad \mathbf{Q}_v^T \quad \mathbf{Q}_w^T \quad \mathbf{Q}_\phi^T]^T \quad (14c)$$

여기서 \mathbf{I} 는 $n \times n$ 의 단위행렬을 나타내며, $\mathbf{0}$ 는 $n \times n$ 의 영행렬을 나타낸다.

2.2 복도체 모델링

식 (13)은 단도체에 대한 운동방정식을 나타낸다. 그러나 갠러핑은 두 개의 송전선이 스페이스 (Spacer)로 연결된 복도체에서 많이 발생한다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 송전선이 다음 그림과 같이 스프링 형태의 스페이스로 연결되어 있는 경우를 고려하였다.

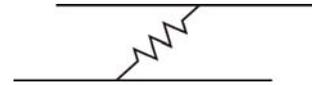


Figure 2 Spring model for spacer

복도체 송전선의 경우 먼저 각각의 송전선에 대한 운동방정식은 식 (13)을 고려해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{K}_t \mathbf{q}_1 = \mathbf{Q}_1, \quad \mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{K}_t \mathbf{q}_2 = \mathbf{Q}_2 \quad (15a,b)$$

두 식을 결합하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} = \mathbf{Q}^* \quad (16)$$

여기서 $\mathbf{q}^* = [\mathbf{q}_1^T \quad \mathbf{q}_2^T]^T$, $\mathbf{Q}^* = [\mathbf{Q}_1^T \quad \mathbf{Q}_2^T]^T$ 이며

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \quad (17a,b)$$

특정위치 x_i 에서의 스페이스를 고려하고 그 위치에서의 각각의 송전선의 변위를 다음 그림과 같이 표현해보자.

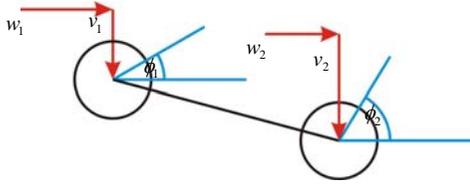


Figure 3 Displacements at each line

그리고 스페이서에는 병진운동에 대한 스프링 뿐만 아니라 비틀에 저항하는 비틀 스프링이 장착되어 있다고 가정하자. 이 경우 스프링으로 인해 발행하는 위치에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{ki} = \frac{1}{2} k_h \left\{ [w_2(x_i) - w_1(x_i)]^2 + [v_2(x_i) - v_1(x_i)]^2 \right\} + \frac{1}{2} k_{\phi_1} \left[\phi_1(x_i) + \frac{v_2(x_i) - v_1(x_i)}{h} \right]^2 + \frac{1}{2} k_{\phi_2} \left[\phi_2(x_i) + \frac{v_2(x_i) - v_1(x_i)}{h} \right]^2 \quad (18)$$

여기서 $k_h, k_{\phi_1}, k_{\phi_2}$ 는 두 전선간의 스프링상수, 송전선 1과 2의 스페이서 장착부위에서의 비틀스프링 상수, h 는 두 송전선 간의 간격을 나타낸다. 앞에서 사용한 변수와 기호를 사용하면 식 (18)는 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ki} = \frac{1}{2} \mathbf{q}^* \mathbf{T} \mathbf{K}_{hi} \mathbf{q}^* \quad (19)$$

여기서

$$\mathbf{K}_{hi} = k_h \mathbf{D}_w^T \Phi_i^T \Phi_i \mathbf{D}_w + k_h \mathbf{D}_v^T \Phi_i^T \Phi_i \mathbf{D}_v + k_{\phi_1} \mathbf{D}_{\phi_1}^T \Phi_i^T \Phi_i \mathbf{D}_{\phi_1} + k_{\phi_2} \mathbf{D}_{\phi_2}^T \Phi_i^T \Phi_i \mathbf{D}_{\phi_2} \quad (20)$$

이며

$$\Phi_i = \Phi(x_i) \quad (21a)$$

$$\mathbf{D}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (21b)$$

$$\mathbf{D}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (21c)$$

$$\mathbf{D}_{\phi_1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{1}{h} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \frac{1}{h} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (21d)$$

$$\mathbf{D}_{\phi_2} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{1}{h} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \frac{1}{h} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (21e)$$

따라서 중간스페이서로 인한 추가적인 위치에너지, 식 (19)를 고려하면 n_s 개의 중간 스페이서를 갖는 복도체 송전선에 대한 운동방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}}^* + \left(\mathbf{K}^* + \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{K}_{hi} \right) \mathbf{q}^* = \mathbf{Q}^* \quad (22)$$

3. 수치계산

수치계산을 위해 Table 1과 같은 물성치를 사용하였다.

Table 1 Parameter values for transmission line

Parameter	Value	Unit
ρA	6.172	kg/m
A	26×10^{-4}	m^2
E	72.4	GPa
G	27.6	GPa
\bar{I}_ϕ	0.25555	$\text{kg m}^2/\text{m}$
J	1.076×10^{-8}	Pa
L	350	m
T	47150	N
d	19.7	m

수치계산을 위해 세 개의 스페이서가 각각 길이의 1/4, 1/2, 3/4 지점에 위치해 있으며, $k_h = 10^6$ N/m, $k_\phi = 10^6$ Nm/rad 으로 가정하고 먼저 고유진동수와 고유진동모드를 구했다. 처음 다섯 개의 고유진동수는 0.12, 0.25, 0.32, 0.37, 0.99 Hz로 1Hz 미만에 많은 고유진동모드가 존재함을 알 수 있었다. 다음 그림은 차수별 주 고유진동모드 형태를 보여준다.

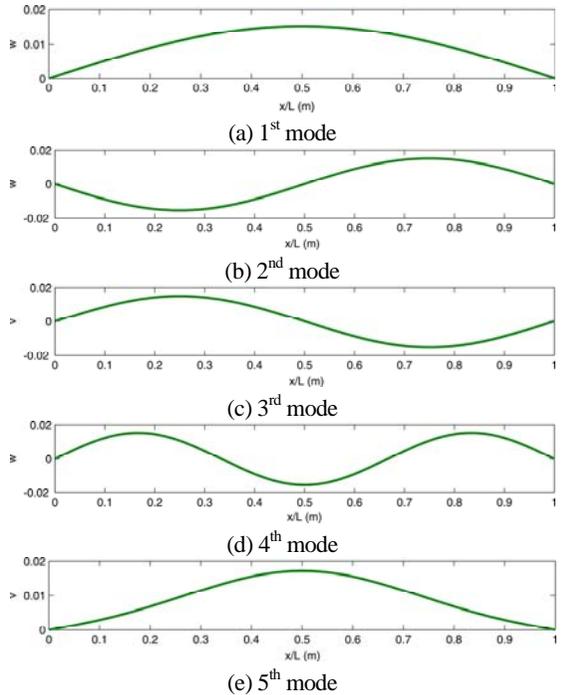


Figure 4 Natural mode shapes

Fig. 4로부터 1차, 2차, 4차 고유진동수는 Out-of-plane 모드, 즉 z 방향의 진동 모드이며, 3차와 5차는 In-plane 모드, 즉 y 방향 모드임을 알 수 있다. 그리고 Longitudinal 방향과의 연성으로 인해 2 루프 모드가 In-plane 진동에서 먼저 나타남을 알 수 있다. 갤러핑은 공기역학적인 특성으로 인해 In-plane 모드의 고유진동모드가 가진되어 나타나는 현상임을 고려할 때 3차와 5차의 고유진동모드가 갤러핑 고유진동모드라고 말할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 먼저 단도체 송전선에 대한 모델을 유도하기 위해 가정모드법을 사용해 송전선의 변위를 이산화하고 에너지 식과 라그랑지 방정식을 이용하였다. 그리고 중간 스페이서가 장착된 복도체 송전선의 갤러핑 진동을 연구하기 위해 중간 스페이서를 스프링 요소로 치환하고 모델링하는 방법을 제시하였다. 복도체에 대한 운동방정식을 유도하고 먼저 고유진동특성을 조사하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

단도체 송전선의 경우 비틀진동 모드가 저차에 나타난다. 따라서 바람이 불고 눈이 내릴 경우에 단도체가 비틀진동이 동시에 일어나기 때문에 갤러핑이 발생하기 쉽지 않은 조건을 가지게 될 것으로 예상된다.

중간 스페이서를 갖는 복도체 송전선의 경우에 대한 운동방정식을 이용해 고유진동수와 고유진동모드를 계산한 결과 1Hz 이하에서 2개의 In-plane 모드가 나타남을 확인하였다. 바람이 한 스펠에 대해 일정하게 불 경우에는 In-plane 고유진동모드 중 2번째 모드가 가진될 것으로 예상된다.

차후 공력의 영향을 고려하여 갤러핑 진동 모델을 완성할 예정이다.

후 기

이 과제는 한국전력연구원 과제 송전선로 진동계측 모듈 개발 및 구조해석 알고리즘 개발의 지원을 받아 수행되었다. 관계자 여러분께 감사드린다.

참 고 문 헌

(1) Den Hartog, J. P., 1932, Transmission Line Vibration Due to Sleet, Trans. A. I. E. E., pp. 1074~1076.

(2) Davison, A. E., 1930, Dancing Conductors, Trans. A. I. E. E., pp. 1444~1449.

(3) Koo, J. R., 2010, Galloping Phenomenon and Analysis Natural Frequency for Conductor Transmission Line, Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference, pp. 378~379.

(4) Gawronski, K., 1977, Computer Simulation of Galloping Catenaries, Electrical Power Systems Research, Vol. 1, pp. 283~289.

(5) Desai, Y. M., Yu, P., Popplewell, N. and Shah, A. H., 1995, Finite Element Modelling of Transmission Line Galloping, Computers & Structures, Vol. 57, No. 3, pp. 407~420.

(6) Shimizu, M. and Sato, J., 2005, Galloping Simulation and Observation of a 4-Conductor Bundle Transmission Line, The Fourth European & African Conference on Wind Engineering, Paper #268.

(7) Zhang, Q., Popplewell, N. and Shah, A. H., 2000, Galloping of Bundle Conductor, Journal of Sound and Vibration, Vol. 234, No. 1, pp. 115~134.

(8) Lee, H.-K., 1997, A Study on Subspan Oscillation Analysis of 6 Bundle Conductor Transmission Lines, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 5, pp. 729~736.

(9) Kim, H.-S. and Byen, G.-S., 2001, A Study on the Analysis of Galloping for Power Transmission Line, Trans. of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 1050~1057.

(10) Irvine, H. M. and Caughey, T. K., 1974, The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable, Proc. R. Soc. Lond. A. Vol. 341, pp. 299~315.