

송전선의 전선도약 해석에 관한 연구

김환성* · 변기식**

A Study on the Analysis of Galloping for Power Transmission Line

H-S Kim* · G-S Byen**

Key words : Galloping(전선도약), Power transmission line(송전선, PTL), Lift force(양력), Drag force(항력), Frequency response(주파수 응답)

Abstract

In this paper, we deal with three types of modelling method for the analysis of galloping in power transmission line(PTL). The single mass model is obtained under the linearization method and it is applied into f -order model. On these models, the nature frequencies of PTL are obtained and it makes an effects on the galloping directly. In simulation, we verify that the maximum magnitude of nature frequency depends on the galloping distance of PTL. Also from the analysis of frequency response, a few kinds of reduction method for galloping are introduced which is effected by distance of PTL, wind velocity and icing types.

1. 서 론

전선도약(Galloping, 깰로핑) 현상은 결빙 및 착설 등으로 가공 송전선(PTL) 단면이 비 대칭성을 이룰 때, 수평방향의 풍력에 의해 송전선에 양력이 발생되며 이로 인하여 송전선에 저 주파수 진동을 발생시키는 현상을 말한다^{[1][2]}. 현재, 깰로핑 현상으로 인해 송전선의 단선사고 및 순시정전(순시 전압강하) 사고가 빈번히 발생되고 있으며, 이는 전

력 수요가에 커다란 영향을 미치고 있다.

이에 대한 방지책으로서 가공 송전선에 스페이서 댐퍼 등을 설치하여 진동억제를 행하고 있으나, 국내에서는 깰로핑에 대한 정확한 연구 및 깰로핑 발생 구간의 지형 및 기상 특성을 고려한 연구가 초기 진행단계에 있어 발생 원인 해석에 어려움을 지니고 있다^[3].

깰로핑에 관한 연구 및 방지 대책에 관한 연구는 일본, 미국, 캐나다, 덴마크, 소련을 비롯한 선진

* 한국해양대학교 물류시스템공학과
** 부경대학교 전기·제어계측공학부

각국에서 활발한 연구가 행해지고 있으며, 실험·관찰적인 방향과 해석적인 방향에서 진행되고 있다. 일본에서는 갠로핑에 대한 연구가 1950년대 후반부터 시작되어^[6], 1970년대 초반에는 갠로핑의 발생원인 및 억제 방법 등이 연구되었으며^[7], 1970년대에는 이론적인 고찰에 근거한 연구가 성황리에 행해졌다.^{[8][9]} 또한 자연상태에서의 갠로핑의 관찰이 동북, 동경, 관서 및 중북지방 등에서 행해져 이론적 해석과 함께 갠로핑에 대한 기초 연구 자료로서 충분한 실적을 확보해가고 있는 실정이다^{[10][11]}.

그러나, 위와 같은 연구결과를 바탕으로 국내 송전선의 갠로핑 해석을 위해서는 국내 지형, 기상 및 기후 등이 충분히 고려되어야 한다. 또한, 비선형적인 운동방정식의 전개로 인한 시뮬레이션의 어려움을 지니고 있으며, 실제 시뮬레이션상에서는 유한요소법 등의 근사화 방법을 대부분 이용하는 실정이다.

따라서, 국내에서도 안정한 전력수요를 위해서는 송전선의 갠로핑 해석 및 이에 대한 방지대책이 시급한 실정이며, 초기 연구단계로서 갠로핑의 선형화 방법에 의한 모델을 개발하며, 이에 대해 갠로핑을 해석하고자 한다.

본 연구에서는, 송전선 모델에 대해 3단계의 선형 모델화법을 제안하며, 주파수응답으로부터 주파수영역에서 갠로핑을 해석하고자 한다. 또한 시뮬레이션을 통하여 갠로핑의 시간응답 분석 및 종래 연구와의 비교를 통하여 본 모델법의 유효성을 확인하며, 이로부터 갠로핑 고찰을 행한다. 마지막으로 갠로핑 방지를 위한 몇가지의 대안을 제시하도록 한다.

2. 송전선 모델링

본 절에서는 송전선에 발생하는 각종 운동에 대해 3가지 형태의 모델을 제시한다.

2.1 좌표계와 운동 정의

일반적으로 좌표계는 두 가지로서 정의되며, 지구에 고정된 절대 좌표계와 송전선에 고정되어 이동하는 이동 좌표계로 나눌 수 있다. Fig. 1은 절대

좌표계로서 송전선 운동해석의 기준이 되는 좌표계로 원점 O 의 위치에 고정시켜 3차원 공간을 X, Y, Z 로 나타낸다.

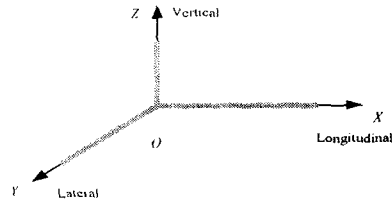


Fig. 1 Earth-fixed coordinate system

이동 좌표계는 원점 O 가 송전선 모델의 집중질량의 무게중심에 고정되어 송전선 운동과 함께 움직이는 좌표계로서 3차원 공간에서 소문자 x, y, z 로 나타낸다.

Fig. 2에서는 송전선의 병진 및 회전운동을 포함한 6자유도 운동을 나타내고 있다. 여기서 병진운동을 하는 속도성분은 종방향의 속도(u), 횡방향의 속도(v), 수직방향의 속도(w)가 있으며, 회전운동을 하는 각도는 롤각도(ϕ), 피치각도(θ), 요우각도(ψ)가 있다. 회전운동을 하는 각속도는 롤 각속도(p), 피치 각속도(q), 요우 각속도(r)가 있다. 그리고, z, y, z 방향의 힘은 F_x, F_y, F_z 으로 모멘트는 M_x, M_y, M_z 으로 표현한다.

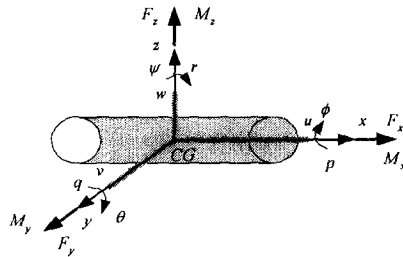


Fig. 2 PTL-fixed coordinate system

2.2 단일 질점 모델

먼저, 송전선을 단일 집중질량으로 가정한 경우의 모델은 Fig. 3과 같다.

여기서 CG는 송전선의 무게중심을 나타내며, k 와 d 는 각각 x, y, z 축 및 ϕ, θ, ψ 각에 대한 강성계수와 감쇠계수를 각각 포함하고 있다.

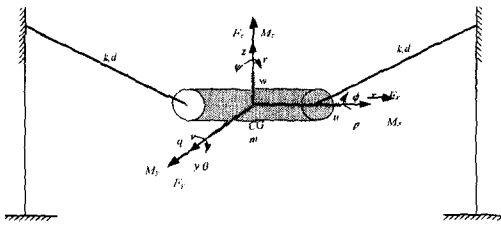


Fig. 3 PTL model with single model

송전선 모델에서 다음 사항을 가정한다.

1. 송전선 철탑은 고정이다.
2. 송전선은 거리에 비례하며 집중질량이다.

위의 모델에서 x, y, z 축으로 각각 병진운동을 고려하면, 이에 대한 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + 2d_x \frac{dx}{dt} + 2k_x x = F_x \quad (1)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + 2d_y \frac{dy}{dt} + 2k_y y = F_y \quad (2)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + 2d_z \frac{dz}{dt} + 2k_z z = F_z \quad (3)$$

여기서 m 은 송전선의 질량을 나타내며 d_x, d_y, d_z 및 k_x, k_y, k_z 는 각각 x, y, z 축 방향의 감쇠계수 및 강성계수를 나타낸다.

또한, 위의 모델에서 ϕ, θ, ψ 방향에 대한 회전운동 방정식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$J_\phi \frac{d^2\phi}{dt^2} + 2d_\phi \frac{d\phi}{dt} + 2k_\phi \phi = M_\phi \quad (4)$$

$$J_\theta \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2d_\theta \frac{d\theta}{dt} + 2k_\theta \theta = M_\theta \quad (5)$$

$$J_\psi \frac{d^2\psi}{dt^2} + 2d_\psi \frac{d\psi}{dt} + 2k_\psi \psi = M_\psi \quad (6)$$

여기서, J_ϕ, J_θ, J_ψ 및 M_ϕ, M_θ, M_ψ 는 각각 ϕ, θ, ψ 방향에 대한 송전선의 관성모멘트 및 모멘트를 나타내며, d_ϕ, d_θ, d_ψ 및 k_ϕ, k_θ, k_ψ 는 회전방향에 대한 감쇠계수 및 강성계수를 각각 나타낸다.

위의 운동방정식에서 x 축과 θ 및 ψ 각에 대한 움직임이 꺾로핑에 대해서 상대적으로 적으므로, 이를 무시하고 상태변수와 출력변수를 다음과 같이

정의하면

$$r_s = [y \ v \ z \ w \ \phi \ p]^T$$

$$y_s = [y \ z \ \phi]^T$$

(2)-(4)식을 이용하면 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{r}_s = A_s r_s + B_s u_s \\ y_s = C_s r_s \end{cases} \quad (7)$$

여기서,

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2k_y}{m} & -\frac{2d_y}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2k_z}{m} & -\frac{2d_z}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2k_\phi}{J_\phi} & -\frac{2d_\phi}{J_\phi} \end{bmatrix}$$

$$B_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_\phi} \end{bmatrix}, \quad C_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$u_s = \begin{bmatrix} F_y \\ F_z \\ F_\phi \end{bmatrix}$$

위의 F_x, F_y, F_z 및 M_x, M_y, M_z 에 대해서는 2.5절에 자세히 나타내기로 한다.

2.3.3 질점 모델

위의 단일 질량형 송전선 모델은 송전선의 질량을 집중질량으로서 한 개소만을 고려했다는 단점이 있다. 위의 모델을 3점 집중질량으로 확장한 모델에 관해 고찰해 보자. 먼저, 3점 집중질량은 각

각 이동 좌표계를 지닌 모델로서 개별화 할 수 있으며, Fig. 4와 같이 나타낸다.

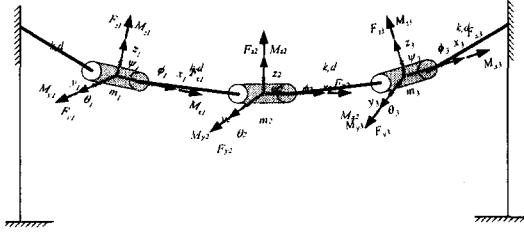


Fig. 4 PTL model with three mass

Fig. 4에서 y 축에 대해서 운동방정식을 세우면 다음과 같다.

$$m_1 \ddot{y}_1 + 2d_y \dot{y}_1 + 2k_y y_1 = F_{y1} + d_y \dot{y}_2 + k_y y_2 \quad (8)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + 2d_y \dot{y}_2 + 2k_y y_2 = F_{y2} + d_y (\dot{y}_1 + \dot{y}_3) + k_y (y_1 + y_3) \quad (9)$$

$$m_1 \ddot{y}_3 + 2d_y \dot{y}_3 + 2k_y y_3 = F_{y3} + 2d_y \dot{y}_2 + k_y y_2 \quad (10)$$

변수 $y = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$ 및 $v = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T$ 를 정의하여 위의 운동방정식을 정리하면 다음의 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ -\frac{2k_y}{m} I_3 & -\frac{2d_y}{m} I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_3 \\ \frac{1}{m} I_3 \end{bmatrix} F_y + \begin{bmatrix} O_3 & O_3 \\ \frac{k_y}{m} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) & \frac{d_y}{m} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ v \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 송전선의 3점의 각 질량은 거리에 비례하므로 $m = m_1 = m_2 = m_3$ 이며, $F_y = [F_{y1} \ F_{y2} \ F_{y3}]^T$ 이다. 단, I_3 은 3차 단위행렬을, O_3 은 3차 영행렬을 나타내며, $\overline{\Delta}_3$ 및 $\underline{\Delta}_3$ 는 각각 3차 upper triangle 행렬과 under triangle 행렬을 나타낸다.

y 축과 동일하게 z 축 및 ϕ 각에 대한 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ -\frac{2k_z}{m} I_3 & -\frac{2d_z}{m} I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_3 \\ \frac{1}{m} I_3 \end{bmatrix} F_z + \begin{bmatrix} O_3 & O_3 \\ \frac{k_z}{m} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) & \frac{d_z}{m} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ -\frac{2k_\phi}{J_\phi} I_3 & -\frac{2d_\phi}{J_\phi} I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_3 \\ \frac{1}{J_\phi} I_3 \end{bmatrix} M_\phi + \begin{bmatrix} O_3 & O_3 \\ \frac{k_\phi}{J_\phi} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) & \frac{d_\phi}{J_\phi} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ p \end{bmatrix} \quad (13)$$

윗식에 대해서 상태변수를 다음과 같이 정의하고

$$r_t = [y \ v \ z \ w \ \phi \ p]^T$$

$$y_t = [y_2 \ z_2 \ \phi_2]^T$$

위의 (11)-(13)식을 정리하면 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{r}_t = \begin{bmatrix} A_{yT} & O_6 & O_6 \\ O_6 & A_{zT} & O_6 \\ O_6 & O_6 & A_{\phi T} \end{bmatrix} r_t + \begin{bmatrix} B_{yT} & O_{6 \times 3} & O_{6 \times 3} \\ O_{6 \times 3} & B_{zT} & O_{6 \times 3} \\ O_{6 \times 3} & O_{6 \times 3} & B_{\phi T} \end{bmatrix} u_t \\ y_t = \begin{bmatrix} O_1 & O_1 & O_1 & O_1 & O_1 & O_1 \\ O_1 & O_1 & O_1 & O_1 & O_1 & O_1 \\ O_1 & O_1 & O_1 & O_1 & O_1 & O_1 \end{bmatrix} r_t \end{cases} \quad (14)$$

여기서,

$$A_{yT} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ \frac{k_y}{m} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) - \frac{2k_y}{m} I_3 & \frac{d_y}{m} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) - \frac{2d_y}{m} I_3 \end{bmatrix}$$

$$A_{zT} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ \frac{k_z}{m} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) - \frac{2k_z}{m} I_3 & \frac{d_z}{m} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) - \frac{2d_z}{m} I_3 \end{bmatrix}$$

$$A_{\phi T} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ \frac{k_\phi}{J_\phi} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) - \frac{2k_\phi}{J_\phi} I_3 & \frac{d_\phi}{J_\phi} (\overline{\Delta}_3 + \underline{\Delta}_3) - \frac{2d_\phi}{J_\phi} I_3 \end{bmatrix}$$

$$B_{yT} = B_{zT} = \begin{bmatrix} O_3 \\ \frac{1}{m} I_3 \end{bmatrix}, \quad B_{\phi T} = \begin{bmatrix} O_3 \\ \frac{1}{J_\phi} I_3 \end{bmatrix}$$

$$u_T = [F_y \ F_z \ M_\phi]^T$$

2.4 2n-1 질점 모델

2n-1차 모델에서는 송전선을 2n-1 구간으로 균등하게 나누고, 각 구간에서 송전선의 무게를 집중

질량으로 고려한 경우로서 Fig. 4와 같다. $2n-1$ 구간을 무한개로 나눌수록 실제 모델에 근접할 수 있으나, 시뮬레이션시 차수가 지나치게 커지므로 해석 가능한 유한한 범위로 제한시켜야 한다.

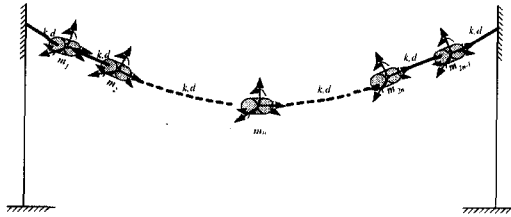


Fig. 5 PTL model with $2n-1$ mass

2.3절에서 보인 3점 집중질량형 모델과 동일하게 (11)-(13)식을 확장시킨 형태로서 다음과 같은 모델을 얻을 수 있다. 단 $f=2n-1$.

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{r}_f &= \begin{bmatrix} A_{yF} & O_{2f} & O_{2f} \\ O_{2f} & A_{zF} & O_{2f} \\ O_{2f} & O_{2f} & A_{\phi F} \end{bmatrix} r_f \\ &+ \begin{bmatrix} B_{yF} & O_{2f \times f} & O_{2f \times f} \\ O_{2f \times f} & B_{zF} & O_{2f \times f} \\ O_{2f \times f} & O_{2f \times f} & B_{\phi F} \end{bmatrix} u_f \\ y_f &= \begin{bmatrix} O_{1 \times (n-1)} & 1 & O_{1 \times (5f+n-1)} \\ O_{1 \times (2f+n-1)} & 1 & O_{1 \times (3f+n-1)} \\ O_{1 \times (4f+n-1)} & 1 & O_{1 \times (f+n-1)} \end{bmatrix} r_f \end{aligned} \right. \quad (15)$$

여기서 행렬 $A_{yF}, A_{zF}, A_{\phi F}, B_{yF}, B_{zF}, B_{\phi F}$ 는 (14)식의 각 행렬의 차수 3을 f 으로 변경한 것과 동일하고 $y, v, z, w, \phi, p, F_y, F_z, M_\phi \in R^{f \times 1}$ 이며, $r_f = [y, v, z, w, \phi, p]^T \in R^{6f \times 1}$ 및 $u_f = [F_y \ F \ M_\phi]^T \in R^{f \times 1}$ 이다.

2.5 결빙각 및 풍력 정의

결빙된 송전선에 풍력이 가해지면, 송전선은 양력과 항력 및 각 좌표계에 대해서 모멘트를 받게 된다. 위의 힘의 관계는 Fig. 6과 같이 나타내어진다.

여기서, α 는 결빙각, β 는 바람의 입사각, V 는 풍속을 나타내며, 풍속에 대한 양력 F_L 와 항력 F_D 및 모멘트력 F_ϕ 는 각각 다음과 같이 나타내어진다.

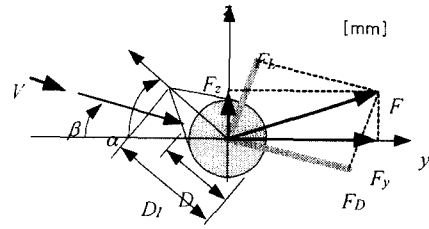


Fig. 6 Wind attack forces and icing angle

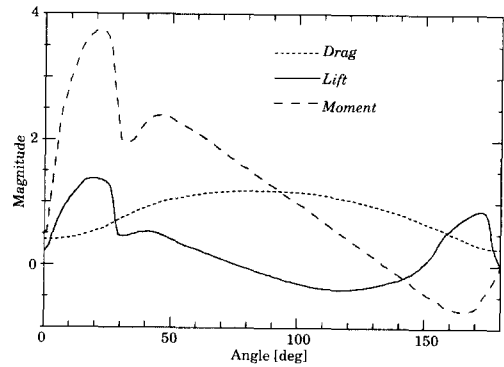


Fig. 7 Aerodynamic Characteristics

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 S \quad (16)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 S \quad (17)$$

$$M_\phi = \frac{1}{2} C_M \rho V^2 D \quad (18)$$

단,

C_L : 양력 계수 [m^{-1}]

C_D : 항력 계수 [m^{-1}]

C_M : 모멘트 계수 [m^{-1}]

V : 풍속 [m]

S : 풍력을 받는 면적 [m^2]

D : 송전선 직경 [m]

D_I : 결빙된 송전선 직경 [m]

ρ : 공기밀도 [kg/m^3]

윗식에서 바람의 입사각을 고려하면 F_y 와 F_z 는 다음과 같이 구해진다.

$$F_y = F \sin \beta \quad (19)$$

$$F_z = F \cos \beta \quad (20)$$

여기서 $F = \sqrt{F_L^2 + F_D^2}$

양력과 항력계수는 결빙형태, 크기, 결빙각 및 풍속에 따라 결정되며, 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 풍동실험에 의한 결과를 이용한다^[21].

3. 모델 비교 및 전선도약 해석

송전선의 모델비교 및 갤로핑 해석을 위해 송전선 파라미터를 Table 1과 같이 정의한다^[6]. 여기서 풍향은 송전선 y축 방향으로 가해지며 일정으로 가정한다.

Table 1 Parameters for simulation

mass of conductor (kg/m)	1.628
diameter of conductor (mm)	28.24
tension of conductor (N)	26,000
stiffness coef. of ϕ axis (N/m)	432
damping coef. of ϕ axis(N · s/m)	0.002541
stiffness coef. of y and z axes(N/rad)	5000
damping coef. of y and z axes(N · s/rad)	0.182
distance between towers (m)	244
mass of ice (kg/m)	0.17
thickness of ice (mm)	5
mass density of air (kg/m ³)	1.2929
moments of inertia on units distance (kg · m ²)	0.000001465
initial angle of icing (deg)	40
initial angle of wind attack (deg)	30

3.1 주파수 영역에서의 갤로핑 해석

주파수 영역에서의 갤로핑 해석을 위해 1점, 3점, 7점, 11점, 21점 집중질량을 고려한 모델에 대해 각각 주파수 응답을 구하였으며, 그 결과는 Fig. 8~9와 같다.

위의 결과로부터 모델의 차수가 커질수록 다른 모드의 진동이 발생되며, 모델의 기본모드는 차수가 증가할수록 저주파영역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그리고, 모델의 차수를 85차 이상으로 증가시키면 1.07[rad/s] 부근에서 거의 변동이 없었다. 또한, 모델의 차수가 21차 부근에서는 2차 모

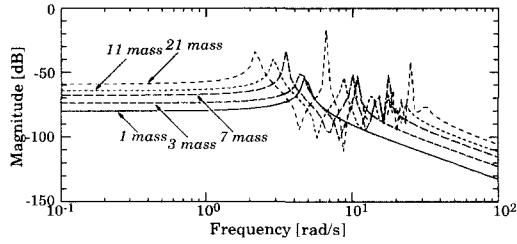


Fig. 8 Bode plot for y and z axes

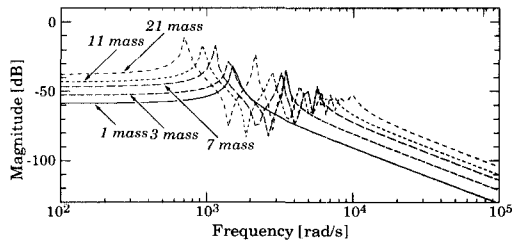


Fig. 8 Bode plot for ϕ axis

드가 오히려 커지며, 이로부터 6.5[rad/s] 부근에서 -17.46[dB]로써 갤로핑의 발생우려가 큼을 알 수 있다.

3.2 갤로핑의 고찰

본 절에서는 3.1절의 내용을 근거로 하여 시뮬레이션을 통하여 그 결과를 고찰하고자 한다. 21차 모델을 대상으로 6.579[rad/s] 주기의 25 [m/s] 풍속을 고려하였으며, 이때 시뮬레이션 결과는 Fig. 10~12와 같다.

Fig. 10과 11은 y축과 z축 방향의 도약거리는 나타내며, Fig. 12는 ϕ 축으로의 송전선의 회전각을 나타낸다. Fig. 10과 11의 결과에서 y축과 z축방향의 도약 크기는 서로 비례적임을 알 수 있고, 이로부터 식(19)와 (20)에서와 같이 y축과 z축에 가해지는 바람의 입사각 β 의 영향임을 알 수 있다.

위의 시뮬레이션 결과는 기존의 연구 결과^[6]와 크기에 20%정도 차이가 있으나, 이는 갤로핑 해석 시 파라미터 추가 및 양력과 항력을 결빙각의 크기에 따라 고려한 원인이라고 사료된다.

이와 더불어, 본 연구에서는 갤로핑의 크기뿐만 아니라, 이에 대한 현상을 실시간적으로 시뮬레이션 가능하다는 것이 주된 특징이다.

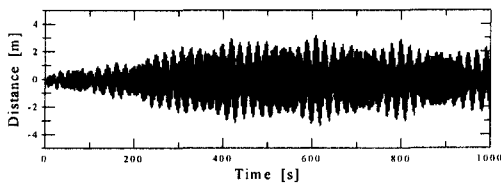


Fig. 10 Galloping result for y axis

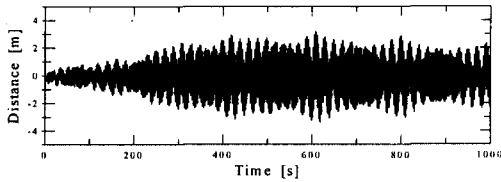


Fig. 11 Galloping result for z axis

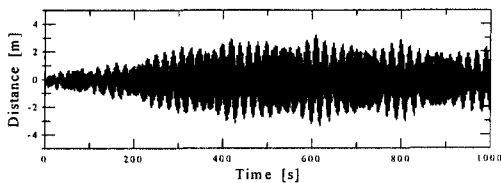


Fig. 12 Galloping result for ϕ axis

3.3 갤로핑 저감을 위한 방안

시뮬레이션을 결과를 통하여 송전선 모델의 지배적인 모드에 의해 갤로핑이 발생됨을 알 수 있으며, 21차 모델의 경우는 2차 모드가 지배적임을 알 수 있다. 따라서 갤로핑 저감법으로서

1. 송전선 모델의 주파수응답에서 각 모드의 크기가 전체적으로 적어지도록,
2. 풍속모드가 송전선 모델의 모드와 일치되지 않도록,
3. 송전선에 결빙되는 두께 범위를 고려하는 등으로서 송전탑간의 거리를 결정해야 한다. 또한, 스페이서 댐퍼등의 부착으로 갤로핑을 억제할 수 있으나, 이 경우 댐퍼 파라미터를 주파수 모드에 의해 결정해야 한다.

위와 같은 갤로핑 저감을 위한 방안을 현실적으로 실현시키기 위해서는 먼저, 본 모델의 유효성을 실험을 통하여 밝혀야 하며, 이를 위해서는 다양한 기후적 및 지형적으로 관련된 갤로핑 데이터가 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 단도체 송전선에 대한 3가지 형태의 모델을 구축하였으며, 모델 비교를 통하여 모델의 유효성을 검토하였다. 또한 제안된 모델을 바탕으로 전선도약을 해석하였으며, 송전선의 길이 및 풍력에 의해 그 크기가 지배적으로 영향을 받음을 확인하였다. 그러나, 결빙형태 및 풍속 변화에 따른 양력과 항력계수의 오차 및 송전선 처짐현상 등의 고려도 추후 진행되어야 할 과제이다. 또한, 본 제안 모델을 기초한 2도체 및 4도체 송전선의 갤로핑 해석과 스페이서 댐퍼 부착시의 댐퍼의 성능효과에 관한 검토 또한 추후에 행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] C.B. Rawlins, "Galloping Conductors", In Transmission Line Reference Book : Wind-Induced Conductor Motion, Palo Alto, CA : Electric Power Research Institutes, Ch. 4, pp. 113~168, 1979.
- [2] A.S. Richardson, "Some Effects of Conductor Twisting on Galloping", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 2, pp. 811~822, 1980.
- [3] R.I. Egbert, et. al., "An Investigation of Power Line De-Icing By Electro-Impulse Methods", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1855~1861, 1989.
- [4] R. Keutgen and J.L. Lilien, "A New Damper to Solve Galloping on Bundled Lines. Theoretical Background, Laboratory and Field Results", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp. 260~265, 1998.
- [5] 노창주, 박한석, 변기식, "Describing Function Method 를 이용한 송전선의 전선도약(Galloping) 현상 해석에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제 41권 4호, pp. 339~345, 1992.
- [6] 吉田貞博, 松林義數, "多導體方式送電線のねん回に關する理論的研究", 日本電氣學會誌, 第79卷, 846號, pp. 539~546, 1959.
- [7] 柏村良一, 大月昉, "ギャロッピングとその對策の研究", 日本電氣學會電力技術研究會資料, ET-73 -7,

1973.

- [8] 五藤員雄, 小池東一郎, “架空送電線のギャロッピング振動の数値計算法と一防止方法”, 日本電氣學會論文誌 B, 第97卷, 7號, pp. 405~412, 1977.
- [9] 山岡勝, “多導体送電線のギャロッピング振動の数値計算法”, 日本電氣學會論文誌 B, 第99卷, 9號, pp. 569~576, 1979.
- [10] 山岡勝, 長谷川淳, “2導体法による架空送電線のギャロッピングシミュレーション計算”, 日本電氣學會論文誌 B, 第116卷, 5號, pp. 539~546, 1996.
- [11] 大熊武司, 以外, “風の亂れを考慮した架空送電線のギャロッピング解析”, 日本電氣學會論文誌 B, 第118卷, 12號, pp. 1386~1397, 1998.

저 자 소 개



김환성(金煥成)

1991년 부경대학교(구, 부산수대) 기관공학과 졸업. 1993년 동대학원 석사(제어공학). 1996년 일본 Ku-mamoto Univ. 박사(제어공학). 1998-1998년 8월 부경대학교 해양산업개발연구소 박사후과정. 1998년 9~현재 한국해양대학교 물류시스템공학과 조교수. 관심분야는 물류기기제어, 관측기설계, Descriptor 시스템, 분산제어 등. 당학회 종신회원.



변기식(邊基植)

1981년 중앙대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 석사(공학 석사). 1990년 Wichita State University (공학 박사). 1990년~현재 부경대학교 전기·제어계측 부교수. 관심분야는 진선진동, 디지털제어, 로버스트제어, 신호처리 등임. 당학회 회원.