



스톡브릿지 댐퍼를 장착한 송전선의 진동해석

Vibration Analysis of Transmission Line with Stockbridge Dampers

구재량* · 송오섭†
Jae-Raeyang Koo* and Oh-Seop Song†

(Received April 9, 2019 ; Revised May 21, 2019 ; Accepted May 21, 2019)

Key Words : Transmission Line(송전선), Stockbridge Damper(스톡브릿지 댐퍼), Dynamic Modeling(동적모델링), Numerical Calculations(진동계산)

ABSTRACT

This paper discusses the dynamic modeling and vibration analysis of transmission lines with Stockbridge dampers. Stockbridge dampers are attached to transmission lines to reduce the vibration amplitude of the transmission line, thus avoiding the risk of fatigue on the line. To build a dynamic model, the kinetic and potential energies of a transmission line with Stockbridge dampers were derived using the assumed mode method and Lagrange's equation. The equations of motion are expressed in matrix form, which is suitable for numerical simulations. The efficiency of Stockbridge dampers on the vibration reduction of the transmission line was numerically investigated by changing their positions and properties. The numerical results show that attachment positions suggested by the installation manual do not provide good performance; therefore, it requires more investigation. It is also shown that a high natural frequency and damping ratio lead to better performance with regard to vibration suppression.

1. 서 론

바람에 의해 발생하는 송전선의 진동을 억제하기 위해서 Fig. 1과 같은 스톡브릿지 댐퍼(Stockbridge damper)가 사용되고 있다.

스톡브릿지 댐퍼는 납으로 만들어진 추와 스프링 역할을 하는 케이블, 그리고 송전선부착을 위한 중앙 클램프로 구성되어 있다. 따라서 댐퍼의 진동특성은 추의 질량과 케이블의 굽힘강성, 케이블의 댐핑값에 의해 결정된다.

이 스톡브릿지 댐퍼는 tuned mass damper로서 송

전선의 진동을 흡수하는 기계 장치이다. 경간 300 m 송전선의 경우 설치 매뉴얼에 양쪽 끝 단으로부터 1.4 m 되는 곳에 이 스톡브릿지 댐퍼를 설치하도록 되어 있다. 스톡브릿지 댐퍼는 1920년 경에 공학자인 Stockbridge에 의해서 발명되었다. 이 댐퍼는 메신저 케이블, 케이블의 양단에 장착된 질량, 송전선과의 결합을 위한 중앙 구조물로 이루어진다. 작동원리는 tuned mass damper 동일하다.

송전선의 진동은 크게 세 가지 모드로 구분한다. 겨울철에 눈이 내리고 바람이 불 경우 송전선에 착설로 인한 진동이 발생할 수 있는데, 착설로 인해 단면의 비대칭성이 발생하고 바람에 의해 양력이 발생해

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Mechanical Engineering at Chungnam National University
E-mail : songos@cnu.ac.kr

* Member, Korea Electric Power Research Institute

‡ Recommended by Editor Soo Il Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

송전선이 0.08 Hz에서 3 Hz 사이의 진동수로 이도(sag)의 0.1에서 1배 이상의 큰 진폭을 가지게 되는 진동이 발생할 수 있다. 이 진동을 갤러핑 이라고 부른다. 갤러핑 문제에 대해서는 그동안 많은 연구가 수행되었다⁽¹⁻⁸⁾. 3 Hz에서 150 Hz의 진동수를 가지고 센티미터 정도의 진폭으로 진동하는 진동을 aeolian진동 이라고 부른다. 그리고 0.15 Hz에서 10 Hz 사이의 진동수로 센티미터 정도의 진폭을 가지는 wake기인 진동이 있다. 세 가지 진동 모드 중 스톡브릿지 댐퍼는 aeolian진동을 억제하는 것을 목표로 개발되었다. 이 주파수 범위 밖의 진동에 대해서는 스톡브릿지 댐퍼가 유효하지 않은 것으로 알려져 있다. Aeolian진동은 송전선 후면에서 발생하는 와류에 의해 수직면 상의 변위가 발생하는 진동인데, 꾸준한 풍속이 이런 와류에 의한 기진력을 만들어내고 이로 인해 송전선에 피로 파괴가 발생한다. 특히 송전선이 고정되는 송전탑 근처의 위치에서 피로파괴가 일어난다.

송전선의 aeolian진동억제를 위해 스톡브릿지 댐퍼가 오랫동안 사용되어 왔지만 송전선의 진동과 연성된 댐퍼의 성능에 대해서는 연구된 바가 많지 않다⁽⁹⁻¹⁴⁾. 이 연구에서는 스톡브릿지 댐퍼를 일자유도 스프링-질량-댐퍼 시스템으로 가정하고 송전선의 진동

과 연성된 모델을 유도하였다. 이 이론 모델을 기반으로 수치계산을 수행하여 스톡브릿지 댐퍼의 물성치가 송전선의 진동에 미치는 영향을 조사하였다

2. 송전선의 동적모델링

Fig. 2와 같이 아래로 처진 송전선을 고려해보자. 여기서 u, v, w 는 각 방향으로의 변위를 나타낸다. L 은 스패 간격, d 는 송전선 중간에서의 정적 처짐을 나타낸다.

송전선의 처짐에 대해서는 이미 Irvine and Caughey⁽¹⁵⁾가 수행한 연구 결과가 있는데 다음 식으로 주어진다.

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

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.

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

현장에서는 이도를 계측한 후 이 식을 이용해 송전선의 장력을 계산한다.

비틀림 진동을 무시하면 Fig. 2와 같이 주어진 모델에 대해 동적에너지와 위치에너지가 다음과 같이 얻어진다.

$$T_c = \frac{\rho A}{2} \int_0^L (\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) dx \tag{3}$$

$$V_c = \int_0^L \left(\frac{1}{2} AEe^2 + T\epsilon + \rho Agv \right) dx \tag{4}$$



Fig. 1 Stockbridge damper

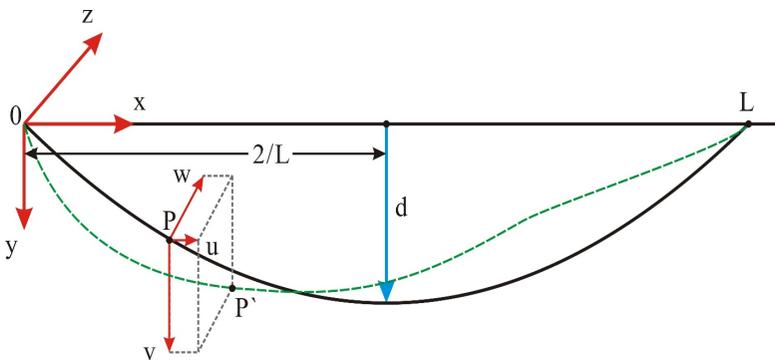


Fig. 2 Coordinate system for transmission line

여기서 E 는 영의 계수를 나타낸다. 변형률은 다음 식으로 주어진다.

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

식 (5)를 식 (3)과 식 (4)에 대입하고 해밀턴 원리를 이용하면 편미분 방정식 형태의 운동방정식을 유도할 수 있다. 그러나 편미분 방정식 형태는 수치계산이 용이하지 않기 때문에 이 연구에서는 가정 모드법 (assumed mode method)과 라그랑지 방정식을 사용하고자 한다. 가정 모드법을 사용하여 각 방향 변위를 다음과 같이 표현해 보자⁽⁸⁾.

$$u = \Phi q_u, v = \Phi q_v, w = \Phi q_w \quad (6a \sim c)$$

여기서 q_u, q_v, q_w 는 각 방향 일반변위 벡터로서 각각 $n \times 1$ 의 벡터를 나타낸다. 케이블의 양단이 고정되어 있기 때문에 허용함수로는 다음과 같은 sine함수가 사용되었다

$$\Phi = \sqrt{2} \left[\sin \frac{\pi x}{L} \quad \sin \frac{2\pi x}{L} \quad \dots \quad \sin \frac{n\pi x}{L} \right] \quad (7)$$

은 $1 \times n$ 허용함수 행렬이다. n 은 허용함수의 개수를 나타낸다. 식 (6)을 식 (3)에 대입하고, 식 (6)을 식 (5)에 대입한 후 그 결과를 식 (4)에 대입하면 케이블에 대한 이산화된 형태의 운동에너지와 위치에너지가 다음과 같은 식으로 유도된다.

$$T_c = \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{q}}_u^T \mathbf{M}_c \dot{\mathbf{q}}_u + \dot{\mathbf{q}}_v^T \mathbf{M}_c \dot{\mathbf{q}}_v + \dot{\mathbf{q}}_w^T \mathbf{M}_c \dot{\mathbf{q}}_w) \quad (8)$$

$$V_c = \frac{1}{2} \mathbf{q}_u^T \mathbf{K}_u \mathbf{q}_u + \frac{1}{2} \mathbf{q}_v^T \mathbf{K}_v \mathbf{q}_v + \frac{1}{2} \mathbf{q}_w^T \mathbf{K}_w \mathbf{q}_w + \mathbf{q}_u^T \mathbf{K}_{uv} \mathbf{q}_v \quad (9)$$

여기서

$$\mathbf{M}_c = (\rho AL) \mathbf{I}_n \quad (10a)$$

$$\mathbf{K}_u = \left(\frac{AE + T}{L} \right) \bar{\mathbf{K}} \quad (10b)$$

$$\mathbf{K}_w = \left(\frac{T}{L} \right) \bar{\mathbf{K}} \quad (10c)$$

$$\mathbf{K}_v = \frac{T}{L} \bar{\mathbf{K}} + \frac{16AE\delta^2}{L} \bar{\mathbf{K}}_v \quad (10d)$$

$$\mathbf{K}_{uv} = \left(\frac{4AE\delta}{L} \right) \bar{\mathbf{K}}_{uv} \quad (10e)$$

여기서 \mathbf{I}_n 는 $n \times n$ 인 단위행렬을 나타내고 $\delta = d/L$ 로 이도율을 나타낸다. 그리고

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

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

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

이다. 여기서 $\xi = x/L$ 로 무차원화된 위치를 나타낸다. 위치에너지 식 (9)를 유도하는 과정에서 중력가속도를 포함한 항은 정적처짐과 관련되어 소거되었다. 이는 송전선의 진동이 평형선인 정적 변형선을 기준으로 발생함을 의미한다.

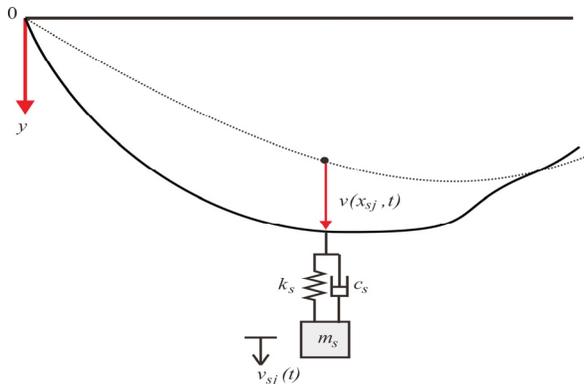


Fig. 3 A spring-mass-damper attached to the line

송전선의 임의 위치에 스톡브릿지 댐퍼가 부착된 경우를 고려해보자. 스톡브릿지 댐퍼를 간단한 1자유도 스프링-질량-댐퍼 시스템으로 가정하고 Fig. 3과 같이 $x = x_{sj}$, ($j=1,2,\dots,m$) 위치에 부착되어 있다고 설정하였다. 여기서 x_{sj} 는 스톡브릿지 댐퍼가 부착된 위치, m 은 설치된 총 스톡브릿지 댐퍼의 개수이다. 그리고 z 방향으로도 스프링-댐퍼가 부착되어 있다고 가정하였다.

Fig. 3에서 m_s, c_s, k_s 는 댐퍼의 질량, 댐핑계수, 스프링상수이다. 각 스톡브릿지 댐퍼의 운동에너지와 위치에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{sj} = \frac{1}{2}m_s(\dot{v}_{sj}^2 + \dot{w}_{sj}^2) \tag{12}$$

$$V_{sj} = \frac{1}{2}k_s \{ [v_{sj} - v(x_{sj}, t)]^2 + [w_{sj} - w(x_{sj}, t)]^2 \} \tag{13}$$

식 (6)을 식 (12)와 식 (13)에 대입하면 각 스톡브릿지 댐퍼의 위치에너지를 이산화된 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{sj} = \frac{1}{2}k_s v_{sj}^2 - v_{sj} \Phi_{sj}^T \mathbf{q}_v + \frac{1}{2} \mathbf{q}_v^T \mathbf{K}_{sj} \mathbf{q}_v + \frac{1}{2}k_s w_{sj}^2 - k_s w_{sj} \Phi_{sj}^T \mathbf{q}_w + \frac{1}{2} \mathbf{q}_w^T \mathbf{K}_{sj} \mathbf{q}_w \tag{14}$$

여기서

$$\mathbf{K}_{sj} = k_s \Phi_{sj}^T \Phi_{sj}, \quad \Phi_{sj} = \Phi(x_{sj}) \tag{15a,b}$$

이다. 따라서 총 운동에너지와 총 위치에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{total} = T_c + \sum_{j=1}^m T_{sj} \tag{16}$$

$$V_{total} = V_c + \sum_{j=1}^m V_{sj} \tag{17}$$

식 (16)과 식 (17)을 라그랑지 방정식에 대입하면 다음과 같은 운동방정식이 유도된다. 댐핑은 Rayleigh 소산 댐핑으로 가정하였다.

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_t \mathbf{q} = \mathbf{Q} \tag{18}$$

여기서 $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_u^T \mathbf{q}_v^T \mathbf{q}_w^T \mathbf{q}_s^T]^T$ 는 케이블의 변위와 관련 있는 일반 좌표들과 각 스톡브릿지 댐퍼의 변위로 구

성되어 있는 변위벡터이다. 여기서 $\mathbf{q}_s = [v_{s1} w_{sj} v_{s2} w_{s2} \dots v_{sm} w_{sm}]^T$ 이다. 그리고 $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_u^T \mathbf{Q}_v^T \mathbf{Q}_w^T \mathbf{0}_{1 \times 2m}]^T$ 는 케이블의 각방향 변위와 관련있는 일반화된 힘벡터로 구성되어 있다. 여기서 $\mathbf{0}_{1 \times 2m}$ 는 $1 \times 2m$ 영행렬이다. 총 질량, 댐핑, 강성행렬들은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_c & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_{n1} & \dots & \mathbf{0}_{n1} \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{M}_c & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_{n1} & \dots & \mathbf{0}_{n1} \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{M}_c & \mathbf{0}_{n1} & \dots & \mathbf{0}_{n1} \\ \mathbf{0}_{1n} & \mathbf{0}_{1n} & \mathbf{0}_{1n} & m_s & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{1n} & \mathbf{0}_{1n} & \mathbf{0}_{1n} & 0 & \dots & m_s \end{bmatrix} \tag{19a}$$

$$\mathbf{C}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_u & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_{n1} & \dots & \mathbf{0}_{n1} \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{C}_v & \mathbf{0}_n & c_s \Phi_{s1}^T & \dots & \mathbf{0}_{n1} \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{C}_w & \mathbf{0}_{n1} & \dots & c_s \Phi_{s1}^T \\ \mathbf{0}_{1n} & c_s \Phi_{s1}^T & \mathbf{0}_{1n} & c_s & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{1n} & \mathbf{0}_{1n} & c_s \Phi_{s1} & 0 & \dots & c_s \end{bmatrix} \tag{19b}$$

$$\mathbf{K}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_u & \mathbf{K}_{uv} & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_{n1} & \dots & \mathbf{0}_{n1} \\ \mathbf{K}_{uv}^T & \mathbf{K}_v^* & \mathbf{0}_n & k_s \Phi_{s1}^T & \dots & \mathbf{0}_{n1} \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{K}_w^* & \mathbf{0}_{n1} & \dots & k_s \Phi_{sm}^T \\ \mathbf{0}_{1n} & k_s \Phi_{s1}^T & \mathbf{0}_{1n} & k_s & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{1n} & \mathbf{0}_{1n} & k_s \Phi_{sm} & 0 & \dots & k_s \end{bmatrix} \tag{19c}$$

여기서 $\mathbf{0}_n$ 은 $n \times n$ 영행렬, $\mathbf{0}_{n1}$ 은 $n \times 1$ 영행렬, $\mathbf{0}_{1n}$ 은 $1 \times n$ 영행렬이다. 그리고

$$\mathbf{K}_v^* = \mathbf{K}_v + \sum_{j=1}^m \mathbf{K}_{sj}, \quad \mathbf{K}_w^* = \mathbf{K}_w + \sum_{j=1}^m \mathbf{K}_{sj} \tag{20a,b}$$

식 (18)은 2차 행렬 상미분방정식인데, Matlab을 사용하기 위해서는 다음과 같은 상태방정식으로 변환하는 것이 바람직하다.

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}^* \mathbf{z} + \mathbf{B}^* \mathbf{f} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}^* \mathbf{z} + \mathbf{D}^* \mathbf{f} \tag{21}$$

여기서 $\mathbf{z} = [\mathbf{q}^T \dot{\mathbf{q}}^T]^T$ 이고 \mathbf{f} 는 기진력을 나타낸다. 그리고

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_p & \mathbf{I}_p \\ -\mathbf{M}_t^{-1} \mathbf{K}_t & -\mathbf{M}_t^{-1} \mathbf{C}_t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}^* = 0 \tag{22a,b}$$

여기서 $p = 3n + 2m$ 으로 총자유도가 된다. \mathbf{B}^* 는 외력이 가해지는 형태에 따라 완성되고, \mathbf{C}^* 는 어떤 센

서를 어느 위치에 사용하느냐에 따라 결정된다. D^* 의 크기도 이에 따라 달라진다.

3. 응답계산

송전선과의 연성 진동 문제를 풀기 위해서 Table 1에 보이는 파라미터 값이 사용되었다. 그리고 원점으로부터 $x_a = 129$ m되는 위치에 한 개의 기진력이 y 방향으로 작용하고, 그 위치에서 y 방향 변위를 한 개의 센서를 이용해 계측한다고 가정하였다. 이 경우

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ M_t^{-1} B_t \end{bmatrix} \quad (23)$$

가 되고, 여기서

$$B_t = [0_{1 \times n} \ \Phi(x_a) \ 0_{1 \times n} \ 0_{1 \times 2m}]^T \quad (24)$$

이다. 그리고 센서 행렬은 다음과 같이 된다.

$$C^* = [0_{1 \times n} \ \Phi(x_a) \ 0_{1 \times n} \ 0_{1 \times n} \ 0_{1 \times 2m}] \quad (25)$$

Fig. 1에 보이는 스톡브릿지 댐퍼의 고유진동수는 대략 13 Hz로 알려져 있다. 그렇지만 송전선의 고유진동모드가 1 Hz 부근에 댐퍼의 고유진동수를 1 Hz로 가정하였다. 또한 댐퍼의 댐핑값이 알려져 있지 않아 우선 1% 감쇠로 가정하였다. 설치 매뉴얼에는

Table 1 Parameters for transmission line

Parameters	Value
ρ	3480 kg/m ³
A	480.8×10^{-6} m ²
E	81.92 GPa
L	300 m
T	20.69 kN
m_s	6.4 kg

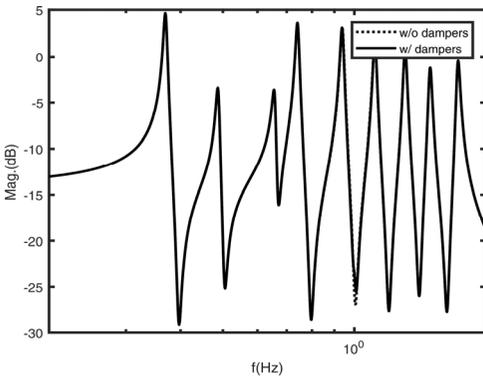


Fig. 4 Frequency response curve ($\zeta_s = 0.01$, $x_s = 1.4$ m, 298.6 m)

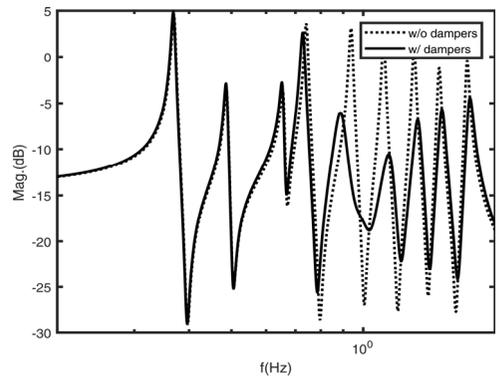


Fig. 6 Frequency response curve ($\zeta_s = 0.1$, $x_s = 15$ m, 285 m)

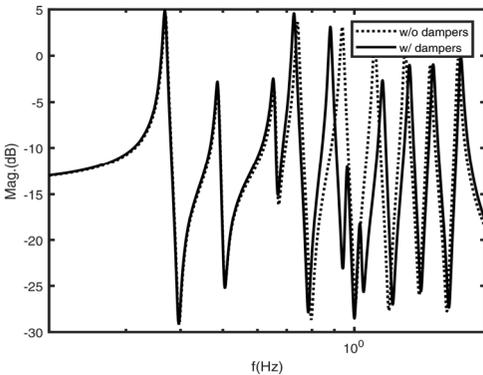


Fig. 5 Frequency response curve ($\zeta_s = 0.01$, $x_s = 15$ m, 285 m)

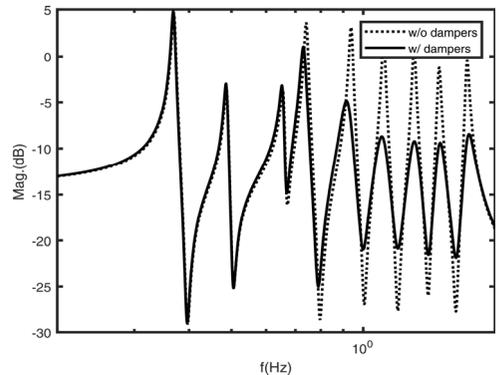


Fig. 7 Frequency response curve ($\zeta_s = 0.3$, $x_s = 15$ m, 285 m)

송전선 양단에서 1.4 m 떨어진 위치에 두 개의 스톡브릿지 댐퍼를 설치하는 것으로 되어 있다. 이와 같은 댐퍼가 설치된 경우와 댐퍼가 없는 경우의 주파수 응답 곡선을 구한 결과가 Fig. 4와 같다. 그림에 보이는 것처럼 설치 매뉴얼의 위치에 댐퍼를 설치하는 경우 주파수 응답곡선에 거의 변화가 없다. 이 위치에서 송전선의 진동의 크기가 작기 때문이다.

설치 매뉴얼 상에 나와 있는 대로 현재 사용중인 댐퍼를 설치할 경우 진동 저감 효과가 확인되지 않기 때문에 우선 댐퍼의 위치를 양단에서 15 m 떨어진 곳으로 이동하는 것으로 고려하고 수치계산을 수행하였다. Figs. 5~7은 스톡브릿지 댐퍼의 댐핑값을 1%, 10%, 30%로 바꿀 경우의 주파수 응답 곡선을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 댐퍼의 설치 위치를 바꿀 경우 진동 저감 효과가 나타남을 알 수 있다. 이는 양단 15 m 되는 위치에서 송전선의 진동이 어느 정도 발생해 댐퍼가 성능을 발휘할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

Figs. 5~7을 비교해보면 댐퍼의 댐핑값이 커질수록 제어할 수 있는 주파수 대역이 커짐을 알 수 있다. 이는 일자유도계에 대해 tuned mass damper를 적용할 경우와 동일한 결과이다. 따라서, 스톡브릿지 댐퍼의 고유진동수를 되도록이면 낮추고 댐핑값을 키우는 구조로 재설계할 필요가 있는 것으로 보인다. 그리고 스톡브릿지 댐퍼의 설치 위치를 현재 보다 양단에서 떨어진 곳에 설치해야 댐퍼의 효과를 볼 수 있을 것으로 예상된다. 송전선의 스톡브릿지 댐퍼 설치 위치에 대한 추가적인 조사가 필요함을 알 수 있다. 또한 스톡브릿지 댐퍼의 설계 규격이 존재하지 않는 상황인데 구조적인 파라미터 값에 대한 재정립이 필요한 시점으로 보인다. 이 연구에서 얻어진 이론 모델은 이런 조사를 위해 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

이 연구에서는 스톡브릿지 댐퍼를 장착한 단도체 송전선의 동적 모델링을 유도하고 수치해석을 통해 댐퍼의 유효성을 검증하였다. 동적 모델을 유도하기 위해 가정모드법과 라그랑지 방정식이 사용되었으며, 행렬 상미분방정식 형태의 운동방정식이 유도되었다. 이 연구에서 유도한 행렬 운동방정식은 고유치해석

뿐만 아니라 임의의 외력에 대한 송전선의 진동응답 계산에 효과적으로 사용될 수 있다.

유도된 운동방정식과 실제 송전선의 물성치를 토대로 임의의 가진에 대한 송전선 진동변위의 주파수 응답곡선이 계산되었다. 수치계산 결과는 현재 설치매뉴얼상의 댐퍼 위치가 송전선의 진동을 억제하는데 크게 도움이 되지 않는 것으로 나타나 차후 설치 위치에 대한 재검토가 필요할 것으로 보인다.

스톡브릿지 댐퍼의 위치 및 물성치에 대한 수치 시뮬레이션을 통해 댐퍼의 고유진동수를 송전선의 고유진동수에 튜닝할 필요가 있음을 보여준다. 또한 댐핑값을 높이는 것이 바람직할 것으로 보인다. 따라서 현재 사용하고 있는 스톡브릿지 댐퍼의 구조와 설치 위치를 개선할 필요가 있을 것으로 보인다. 향후 와류에 기인한 aeolian진동응답에 대한 연구가 진행될 예정이다.

References

- (1) Den Hartog, J. P., 1932, Transmission Line Vibration due to Sleet, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 51, No. 4, pp. 1074~1076.
- (2) Davison, A. E., 1930, Dancing Conductors, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 49, No. 4, pp. 1444~1449.
- (3) Koo, J. R., 2010, Galloping Phenomenon and Analysis Natural Frequency for Conductor Transmission Line, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 378~379.
- (4) Gawronski, K., 1977, Computer Simulation of Galloping Catenaries, Electric Power Systems Research, Vol. 1, No. 4, 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) 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.
- (7) 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.

(8) Kwak, M. K., Koo, J. R. and Bae Y. C., 2014, Dynamic Modeling of Transmission Line Galloping Vibrations, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 518~522

(9) Wagner, H., Ramamurti, V., Sastry, R. V. R. and Hartman, K., 1973, Dynamics of Stockbridge Dampers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 30, No. 2, pp. 207~229.

(10) Dhotarad, M. S., Ganesan, N. and Rao, B. V. A., 1978, Transmission Line Vibration with Dampers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 60, No. 4, pp. 604~606.

(11) Hagedorn, P., 1982, On the Computation of Damped Wind-excited Vibrations of Transmission Lines, Journal of Sound and Vibration, Vol. 83, No. 2, pp. 253~271.

(12) Vecchiarelli, J., Currie, I. G. and Havard, D. G., 2000, Computational Analysis of Aeolian Conductor Vibration with a Stockbridge-type Damper, Journal of Fluids and Structures, Vol. 14, pp. 489~509.

(13) Kim, C. J., 2016, Determination of Design Parameters of Stockbridge Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 7, pp. 814~819.

(14) Park, S., Song, O., 2018, Vibration Characteristics of Stockbridge Damper for Transmission Line, Transactions

of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 417~422.

(15) 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.



Jae-Raeyang Koo received B.S. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Sungkyunkwan University in 1994 and M.S. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Chungnam University in 2004. He is currently a senior researcher at the Korea Electric Power Research Institute in Daejeon, Korea. His research area is acoustic vibration of structure.



Oh-Seop Song received B.S. degree from the Dept. of Mechanical Design Engineering at Seoul National University. His Ph.D. degree was awarded by Virginia Polytechnic Institute & State University. He is currently a professor in the Dept. of Mechanical Engineering at Chungnam National University, Daejeon, Korea.