

## 다물체 동역학을 이용한 송전선의 슬릿점프 시뮬레이션

### Sleet Jump Simulation of Power Transmission Line by Using Multi-Body Dynamics

김지욱<sup>1</sup>, 손정현<sup>2\*</sup>

Ji-Wook Kim<sup>1</sup>, Jeong-Hyun Sohn<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Since the power transmission line(PTL) passes through the high mountain and heavy snowfall region, it is necessary to keep the stability of the PTL. In this study, PTL is modeled as a mass-spring-damper system by using RecurDyn. The lumped mass model is verified by calculated from the simulation comparing the deflection analysis according to the sag and tension. In order to analyze the dynamic behavior of PTL, a damping coefficient for a multi-body model is derived by using the free vibration test and Rayleigh damping theory. Sleet jump simulation according to the region is performed. The maximum jump height, icing sag and amount of jump are confirmed. Also, the amount of jump and the reaction force at the supporting point according to the tension and load of ice are analyzed, respectively. As a result, it is noted that the amount of jump and reaction force are influenced more by the load of ice than by the tension of PTL.

*Keywords : Power Transmission Line, Rayleigh Damping, Sleet Jump, Multi-body Dynamics*

---

1 제1저자, 부경대학교 대학원 기계설계공학과

2\* 교신저자, 부경대학교 기계설계공학과

E-mail: jhsohn@pknu.ac.kr

1 First author, Graduate school of Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University

2\* Corresponding Author, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University

### 1. 서론

송전선이 고산 및 다설지역을 통과함에 따라 착설 또는 착빙이 예상되고 착빙에 의해 전선도약(Sleet jump), 갤러핑(Galloping) 등이 발생한다. 이러한 현상은 송전선의 단락사고 및 전압강하 등의 사고를 유발하며, 전력공급에 큰 영향을 미친다. 송전선에 부착된 착빙이 기온상승, 풍압 또는 전선의 주울 열 등에 의한 원인으로 탈락하는 경우 그 충격으로 인해 전선이 위로 도약하게 되는데 이러한 현상을 전선도약(Sleet jump)이라 한다. 전선도약은 전선에 부착된 빙설이 탈락하면서 전선의 내부 에너지가 운동에너지와 위치에너지로 변화하는 현상으로 착빙이 부분적으로 탈락하는 경우 문제가 되지 않는다. 하지만 착빙이 일제히 탈락하는 경우 그 충격에 대한 반동으로 전선이 위로 튀어 오르면서 전선 상호간 또는 가공지선과의 사이에 아크가 발생하면서 단락 또는 지락 고장을 일으킨다. 또한 전선도약으로 인하여 전선이 무장력 상태로 될 경우에는 불평균장력으로 인해 첩탑이 파손되는 경우도 있다. 이에 대한 방지책으로 전선 상호간의 오프셋(Off-set)을 두어 전선의 선간 단락사고를 예방하고 있다[1-2].

본 연구에서는 착빙하중과 송전선의 장력에 따른 전선도약을 예측하기 위해 상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 송전선을 집중질량-스프링-댐퍼로 모델링하였다. 케이블의 처짐 이론과 비교하여 동역학 모델을 검증하였다. 모델링에 필요한 송전선의 감쇠계수를 구하기 위해 자유진동 실험을 통한 Rayleigh 감쇠를 구하였다. 착빙이 예상되는 지역의 설계 착빙하중과 장력을 이용하여 전선 도약 시뮬레이션을 수행하고, 지역에 따라 발생하는 도약량과 지지점에서의 반력을 구하였다.

### 2. 송전선 모델링

송전선은 길이가 매우 길기 때문에 유한요소법으로 해석 시 소요되는 시간이 많이 요구된다. 해석시간을 감소시키기 위해 송전선을 집중질량과 스프링 및 댐퍼를 이용하여 모델링하였고 송전선의 지지점은 고정이라 가정하였다.

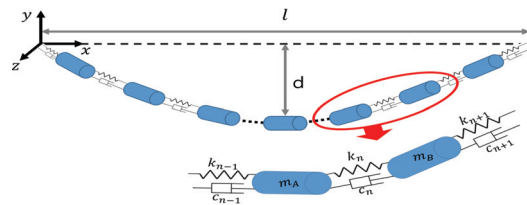


Fig. 1 Coordinate system and lumped mass model of power transmission line

송전선 모델링을 위한 좌표계 정의와 질점을 Fig. 1에 나타내었다. 여기서  $l(m)$ 은 경간(Span)을 나타내며  $d(m)$ 는 이도(Sag)를 나타낸다. 각 질점들은 질량-스프링-감쇠계로 나타낼 수 있으며 본 연구에서는 경간 500m에 대하여 31개의 질량 요소와 32개의 스프링 및 댐퍼를 이용하여 모델링하였다. 송전선의 다물체 동역학 모델을 운동방정식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$[m]\{\ddot{q}\} = Q \tag{1}$$

여기서  $[m]$ 은  $93 \times 93$ 의 질량행렬이며,  $\{\ddot{q}\}$ 는 각 질점의 가속도 벡터를 나타내고 식(2)와 같다.  $Q$ 는 외력을 나타내며 식(3)과 같다.

$$\{\ddot{q}\} = [\ddot{y}_1, \ddot{z}_1, \ddot{\phi}_1, \ddot{y}_2, \ddot{z}_2, \ddot{\phi}_2, \dots, \ddot{y}_{31}, \ddot{z}_{31}, \ddot{\phi}_{31}]^T \tag{2}$$

$$Q = Q_g + Q_c + Q_k + Q_T \tag{3}$$

여기서  $x$ 방향의 변위 및  $y$ 축 및  $z$ 축에 대한

회전은 상대적으로 움직임이 적으므로 제외하였다.  $Q_y$ 는 중력,  $Q_c$ 는 감쇠력,  $Q_k$ 는 스프링 힘,  $Q_T$ 는 장력을 나타내며 식(4~7)과 같이 정의된다.

$$Q_y = [-m_1g, 0, 0, -m_2g, 0, 0, \dots -m_{31}g, 0, 0] \quad (4)$$

$$Q_c = [c]\{\dot{\delta}\} = [c]\{\dot{l} - \dot{l}_0\} \quad (5)$$

$$Q_k = [k]\{\delta\} = [k]\{l - l_0\} \quad (6)$$

$$Q_T = [T_{y_1}, T_{z_1}, 0, T_{y_2}, T_{z_2}, 0, \dots T_{y_{31}}, T_{z_{31}}, 0] \quad (7)$$

여기서  $g(m/s^2)$ 는 중력가속도,  $\dot{\delta}(m/s)$ 과  $\delta(m)$ 는 각각 변형 속도와 변형량이다. Fig. 2는 RecurDyn을 이용한 송전선 모델링이다.

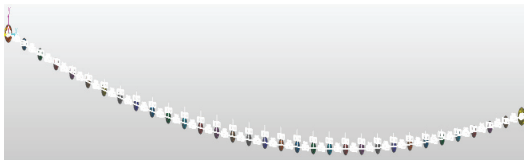


Fig. 2 Power transmission line modeling by using RecurDyn

다물체 동역학 모델을 검증하기 위해 송전선의 처짐 곡선과 시뮬레이션을 비교하였다. 송전선의 처짐 곡선이 포물선 형상을 가진다고 가정하고, 선형이론을 사용하면 송전선의 처짐 곡선은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$y = -\frac{mgl^2}{2T} \left\{ \left( \frac{x}{l} \right) - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

여기서  $m(kg/m)$ 은 단위 길이 당 하중,  $T(N)$ 는 송전선의 장력이다. 송전선의 최대 처짐(이도)은  $\frac{l}{2}$  지점에서 발생하며 그 크기는 식(9)와 같다.

$$d = \frac{mgl^2}{8T} \quad (9)$$

적절한 집중질량 개수의 선정을 위해 경간 이 500m인 일반지역을 대상으로 비교하였다. 일반 지역의 설계이도는 11.48m이며 장력은 47kN이다. Fig. 3은 집중질량 개수에 따른 시뮬레이션과 처짐 곡선을 비교하였다.

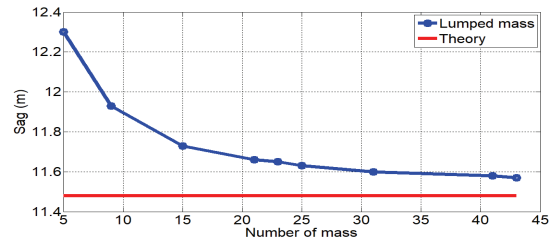


Fig. 3 Sag according to the number of mass

집중질량의 개수가 31개 일 때, 약 1%의 오차를 가지며 그 이상이 되면 감소율은 낮아지고 해석 시간이 비약적으로 증가한다. 그러므로 본 연구에서는 집중질량의 개수를 31개로 선정하고 다설 및 중다설지역의 송전선 모델에 적용하여 검증하였다. 적설기간이 1개월 이상인 지역을 다설 지역(Heavy snowfall region)으로 구분하며 다설 지역 중에서 해발 800m이상의 지역은 착빙이 현저할 것으로 예상되어 중다설지역(High mountain region)으로 구분한다. 지역에 따른 착빙설 설계 기준은 Table 1과 같다.

Table 1. Icing design standard

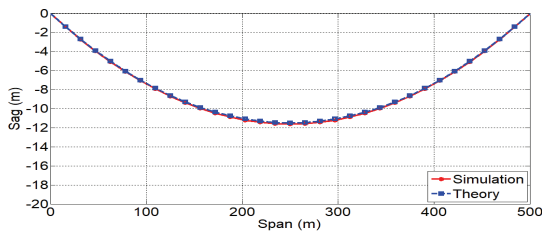
Region	Normal	Heavy snowfall	High mountain
Thickness (mm)	6	20	40
Specific gravity	0.9	0.6	0.6

Table 2는 지역에 따른 설계이도를 나타낸 것이며 Fig. 4는 지역에 따른 처짐 곡선과 시뮬레이

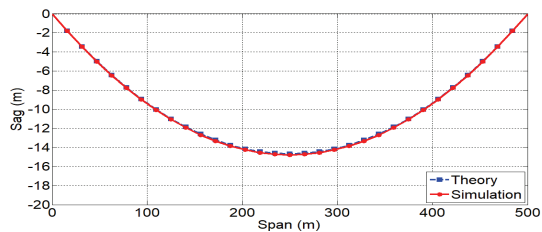
선 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 결과 오차율은 모두 1% 내외로 31개의 송전선 다물체 모델링은 일반, 다설 및 중다설 지역에 대하여 정확성 높은 모델임을 검증하였다.

Table 2. Sag according to the region

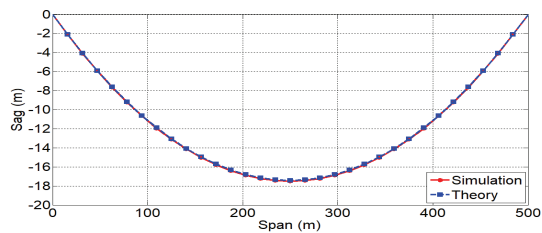
Region	Normal	Heavy snowfall	High mountain
Sag (m)	11.48	14.67	17.41



(a) Normal region



(b) Heavy snowfall region



(c) High mountain region

Fig. 4 Comparison of the simulation and theory

### 3. 송전선의 자유진동 실험

송전선의 동적 거동을 해석하기 위해 내부 감쇠력을 모델링해야한다. 감쇠력을 모델링하기 위해 감쇠계수가 요구되는데 자유진동 실험과 Rayleigh 감쇠를 이용하여 감쇠계수를 구하였다. 자유진동 실험은 고속카메라를 이용하여 수행하였고 자유진동 실험의 장치구성은 Fig. 5와 같다. 송전선의 진동에 영향을 미치지 않도록 송전선을 충분히 무거운 물체에 고정하여 실험을 진행하였다.

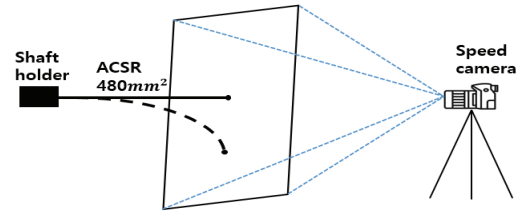


Fig. 5 Configuration of experimental system

송전선 자유 진동 실험은 외팔보 상태에서 자중에 의해 변형이 일어나는 송전선 끝단의 위치 변화를 분석하였다. 위치 변화 분석을 위해 모션 분석 프로그램인 TEMA를 이용하였다. Fig. 6은 송전선의 길이에 따른 끝단의 변위를 나타낸다.

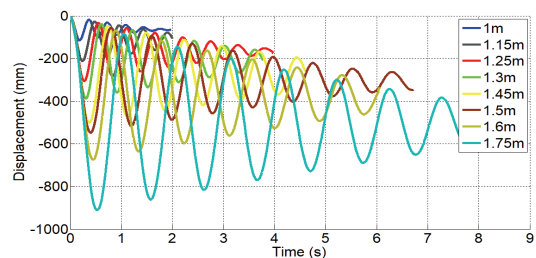


Fig. 6 Displacement of end point under free vibration test

자유진동 실험을 통해 구한 변위를 이용하여

Rayleigh 감쇠 계수를 구하기 위해 고유진동수가 필요하다. 외팔보 조건에서 고유진동수는 식(10)과 같이 구할 수 있다[4].  $\beta_n l$ 은  $n$ 차 고유진동수에 따른 상수로 경계조건에 따라 다르다. 외팔보 조건에서  $\beta_n l$ 은  $\beta_1 l = 1.875104$ ,  $\beta_2 l = 4.694091$ 이다.

$$\omega_n = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (10)$$

여기서  $E(N/m^2)$ 는 탄성계수,  $I(m^4)$ 는 단면 2차 모멘트,  $\rho(kg/m^3)$ 는 밀도,  $A(m^2)$ 는 단면적,  $l(m)$ 은 길이를 나타낸다. Rayleigh 감쇠는 비례 감쇠의 한 종류로서 구조물의 강성행렬과 질량행렬의 선형 조합으로 나타내며 식(11)과 같이 나타낼 수 있다[5-6].

$$[C] = [M]\alpha + [K]\beta \quad (11)$$

이때,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 질량비례 및 강성비례 상수이며, 구조물의 주요한 2개의 모드가  $i$ 번째 모드와  $j$ 번째 모드일 때, 감쇠비는 식(12)와 같다.

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/w_i & w_i \\ 1/w_j & w_j \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{pmatrix} \quad (12)$$

감쇠비는 시간영역의 데이터에서 진동 주기와 진폭을 이용하여 계산하며 식(13)과 같다.

$$\zeta_i = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (13)$$

여기서  $\delta$ 는 대수감소율이며 식(14)와 같고  $A$ 는 진폭을 나타낸다.

$$\delta_i = -\ln\left(\frac{A_n}{A_1}\right) \quad (14)$$

송전선의 물성은 Table 3과 같다. 외팔보의 자유진동실험을 통해 1차 고유진동수를 구하고 2차 고유진동수는 이론식을 통해 구하였다. 2차 감쇠비는 1차 감쇠비와 차이가 크지 않기 때문에 동일하다 가정하였다.

Table 3. Properties of PTL

Parameters	Value
Cross section (m <sup>2</sup> )	480 × 10 <sup>-6</sup>
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2421.61
Elastic modulus (GPa)	72.49
Moment of inertia (m <sup>4</sup> )	3.9081 × 10 <sup>-10</sup>

실제 송전선은 길이가 매우 길기 때문에 실험을 통하여 진폭을 구하는 것이 어렵다. 송전선 길이에 따른 진폭비는 Fig. 7에서와 같이 일정 값으로 수렴해 간다. 본 연구에서는 역방정식(Power equation)을 이용하여 진폭비를 곡선 접합하였고, 이를 이용하여 Rayleigh 감쇠계수를 추정하였다.

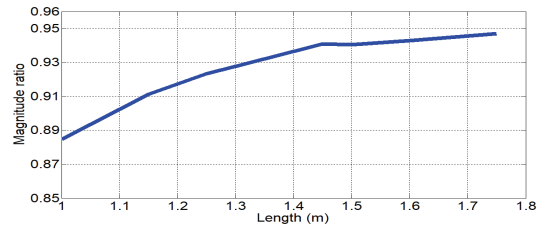


Fig. 7 Amplitude ratio according to the length of PTL

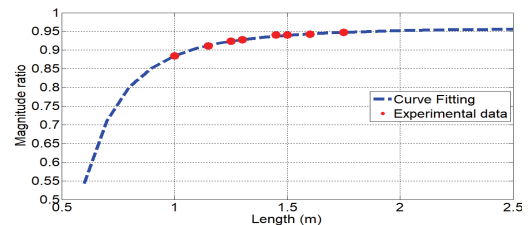


Fig. 8 Curve fitting by using the power equation

진폭비를 멱방정식을 이용하여 곡선접합하면 Fig. 8과 같고, 멱방정식은 식(15)와 같다.

$$\Delta = -0.07507 \cdot l^{-3.354} + 0.9593 \quad (15)$$

강성은 길이에 반비례하며 식(16)과 같다.

$$k = \frac{AE}{l} \quad (16)$$

Table 4에서 송전선 길이에 따른 질량, 강성 및 감쇠계수를 나타냈다. 집중질량의 개수가 31개 일 때 질점의 길이는 15.63m이며 감쇠계수는 57019Ns/m이다.

Table 4. Spring and damping coefficient

Length (m)	Mass (kg)	Spring coefficient (10 <sup>8</sup> N/m)	Damping coefficient (Ns/m)
1	1.76	34798	10754
1.15	2.024	30259	9386
1.25	2.2	27838	8749
1.3	2.288	26767	8578
1.45	2.552	23998	7767
1.5	2.64	23198	8082
1.6	2.816	21748	8288
1.75	3.08	19884	8370
⋮			
15.63	27.5	2227	57019

#### 4. 전선도약 시뮬레이션

송전선의 도약량은 내부에너지가 운동에너지와 위치에너지로 변화하는 것을 이용하여 구할 수 있으며 그 도약량은 식(17)을 이용하여 구할 수 있다[7].

$$\eta = \frac{\gamma}{4M} \quad (17)$$

여기서  $\eta$ 는 식(18)과 같고,  $M$ 은 하중선로 상수라 하며 식(19)와 같다.  $\gamma$ 는 적설 시 하중계수이다.

$$\eta = (d_1 - d_2)/d_1 \quad (18)$$

$$M = \frac{64EA d_1^3}{2\gamma\omega l^4} \quad (19)$$

여기서  $d_0(m)$ 는 무착설 시 이도,  $d_1(m)$ 은 착빙 시 이도 그리고  $d_2(m)$ 는 최대 도약 시 이도를 나타내며 Fig. 9와 같다.  $E(kgf/mm^2)$ 는 송전선의 탄성계수,  $A(mm^2)$ 는 송전선의 단면적을 나타낸다. 식(18)은 송전선이 항상 포물선 형상을 가진다고 가정하기 때문에 실제 송전선로와는 다소 오차가 있다.

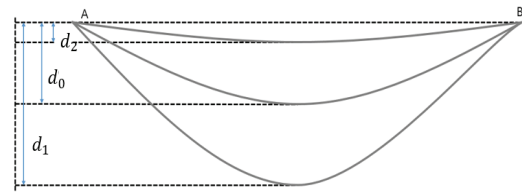


Fig. 9 Sag according to the icing

전선도약 시뮬레이션은 송전선에 착빙된 하중이 동시에 탈락된다는 가정 하에 각 질점에 가해지고 있는 착빙하중을 동시에 제거하여 그 때 위로 튀어 오르는 도약량을 확인하였다. Table 5는 각 지역에 따른 설계 착빙 하중이다. Table 6은 지역에 따른 무착빙 시 이도, 착빙 이도, 최대 도약이도 및 도약량을 나타내며 Fig. 10은 각 지역별 이도의 변화를 나타낸다.

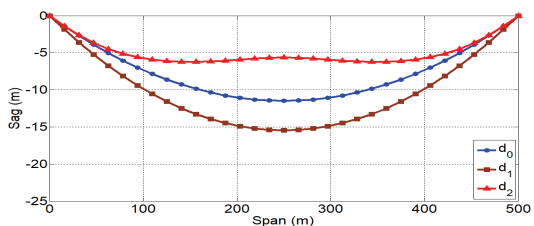
Table 5. Load of ice according to the region

Region	Load of ice(kg/m)
Normal	2.45
Heavy snowfall	3.74
High mountain	7.15

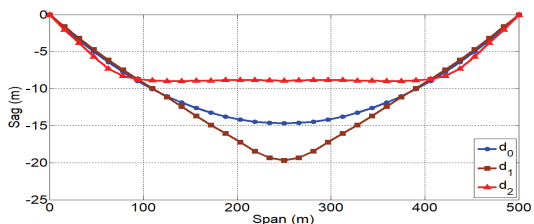
Table 6. Results of sleet jump simulation

Region	Normal	Heavy snowfall	High mountain
$d_0$ (m)	11.48	14.67	17.41
$d_1$ (m)	15.45	19.65	23.94
$d_2$ (m)	5.62	8.90	8.60
Increment (m)	9.83	10.75	15.35

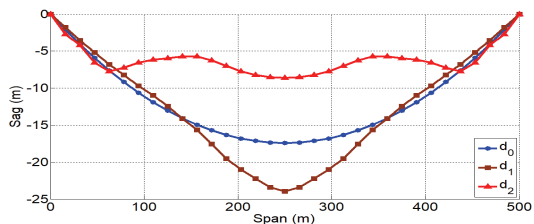
중다설 지역의 경우 가장 큰 착빙 하중을 받고 있다. 착빙 시 전선에 의한 탄성에너지가 가장 크기 때문에 가장 큰 도약량을 나타낸다. Fig. 11은 지역별 착빙 하중과 송전선의 장력에 따른 착빙 하중과 장력이 증가할수록 최대 도약 높이와 지지점에서의 반력이 증가하고, 착빙하중이 증가할수록 최대 착빙 이도는 감소한다. 일반지역의 경우 장력이 변하더라도 도약량이 약 8m로 거의 일정하며 지지점에서 반력이 상대적으로 작다. 다설 및 중다설 지역의 경우 도약량이 각각 10m~14m, 21m~23m로 일반 지역에 비해 매우 크며 단락사고 위험이 있다. 다설 및 중다설 지역의 지지점에서 반력은 각각 80kN, 120kN 이상이 발생



(a) Normal region

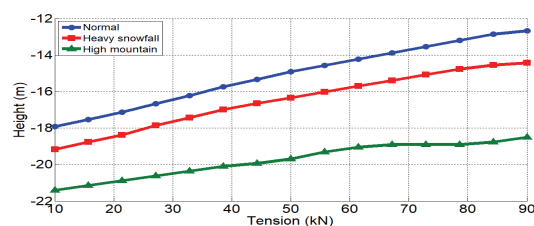


(b) Heavy snowfall region

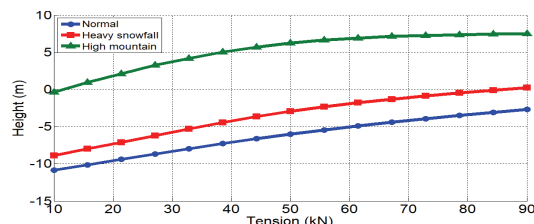


(c) High mountain region

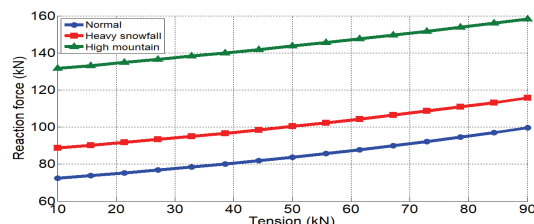
Fig. 10 Sleet jump according to the region



(a) Icing sag



(b) Maximum jump height



(c) Reaction force at supporting point

Fig. 11 Result of sleet jump according to the icing load

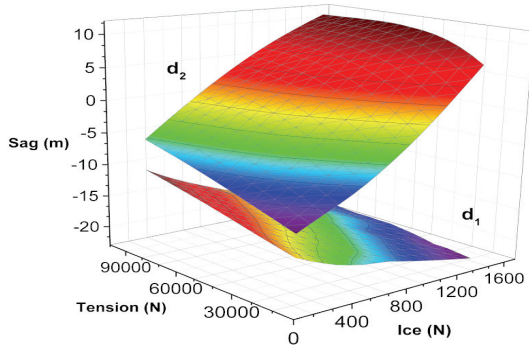


Fig. 12 Sag according to the tension and icing load

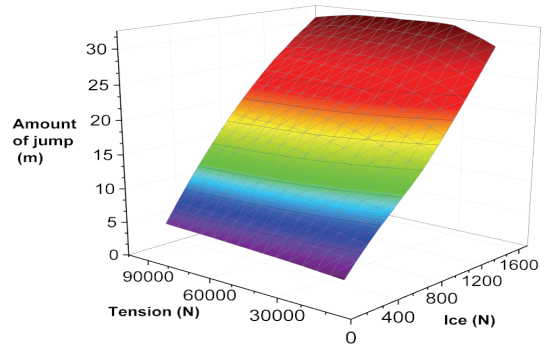


Fig. 13 Amount of jump according to the tension and icing load

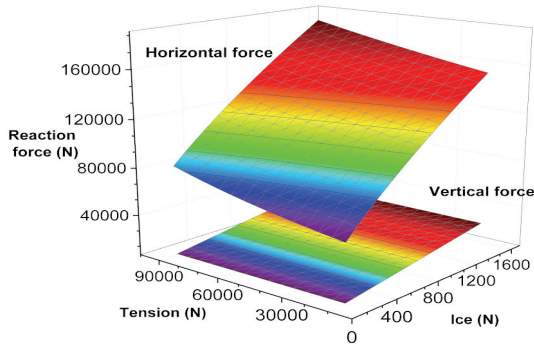


Fig. 14 Reaction force according to the tension and icing load

하며 송전탑에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

전선 도약은 착빙하중과 전선의 장력에 따라 그 도약량이 달라진다. 장력 및 착빙하중에 따른 최대 도약량과 지지점에서의 반력을 도출하였다. 전선의 장력은 10kN에서 90kN까지 고려하였고 착빙하중은 1kg/m에서 10kg/m로 고려하였다. 착빙하중은 절점길이가 15.625m이므로  $W_{ice} = 15.625 \cdot g m_{ice}$ 이다. Fig. 12는 착빙 하중과 장력에 따른 착빙 이도와 최대 도약 이도를 보여준다. 착빙 하중이 증가함에 따라 최대 도약 높이는 증가하고 착빙 이도는 감소한다. 최대 도약 높이는 11.2m이며 그때 송전선의 장력과 착빙 하중은 각각 61kN, 10kg/m이다. 송전

선의 최대 착빙 이도는 -22.9m이며 그때의 송전선의 장력과 착빙하중은 각각 10kN, 10kg/m이다. Fig. 13은 도약량을 나타내는데 착빙이 탈락 후 도약하는 도약량은 장력에 의한 영향보다는 착빙 하중에 의한 영향이 더 크다. 최대 도약량은 32.5m가 발생하며 그때의 장력과 착빙 하중은 각각 56kN, 10kg/m이다.

Fig. 14는 장력과 착빙 하중에 따른 송전선 지지점에서의 반력을 나타내며, 송전철탑에 걸리는 하중을 뜻한다. Fig. 14에서 Horizontal force는 송전선을 정면에서 보았을 때 경간 방향, 즉 수평 방향의 반력을 나타내며, Vertical force는 지면에 대해 수직인 방향의 반력을 나타낸다. 지지점에서의 수평 반력은 수직 반력보다 큰 값을 가지며 하중과 장력이 증가함에 따라 증가한다. 최대 수평 반력은 182kN이며 장력과 착빙하중이 최대일 때 나타난다. 수직 반력은 송전선 장력에 의한 영향은 거의 없고 착빙 하중에 대한 영향이 큰 것으로 보이며 최대 수직 반력은 28kN이다.

전선도약 시뮬레이션에서는 500m경간의 모든 착빙 하중이 일제히 탈락했을 경우를 가정한 것이므로 실제 송전선에서는 이와 같은 도약과 반력이 나올 가능성은 매우 희박하다.



## 5. 결론

본 논문에서는 RecurDyn을 이용하여 송전선을 집중질량-스프링-감쇠계로 모델링 하였다. 처짐 해석을 통하여 집중질량의 개수를 31개로 선정하였고, 일반, 다설 및 중다설 지역의 설계이도 및 장력을 기준으로 모델링을 검증하였다. 자유진동 실험과 Rayleigh 감쇠를 이용하여 송전선의 감쇠 계수를 구하였다. 송전선의 다물체 모델을 이용하여 전선 도약 시뮬레이션을 수행하였다.

- 지역 구분에 따른 전선도약 시뮬레이션 결과, 일반지역의 경우 장력이 변하더라도 도약량이 약 8m로 일정하며, 지지점에서 반력이 상대적으로 작다. 다설 및 중다설 지역의 경우 도약량이 각각 10~14m, 21~23m로 일반지역에 비해 크고, 반력도 각각 약 80kN, 120kN이상으로 일반지역에 비하여 큰 값을 가진다.
- 송전선의 장력과 착빙 하중에 따른 시뮬레이션 결과, 최대 도약량은 장력과 착빙 하중이 각각 56kN, 10kg/m일 때, 32.5m가 발생하였다. 지지점에서의 수평 반력은 182kN가 발생하며 수직 반력보다 큰 값을 가진다. 지지점에서의 반력은 착빙하중과 장력이 커짐에 따라 증가한다.

line,” KSNVE, Vol. 2015, no. 4, pp. 735-738, (2015).

- [3] Irvine, H. M., Caughey, T. K., “The linear theory of free vibrations of a suspended cable,” In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 341, no. 1626, pp. 299-315, (1974).
- [4] Singiresu S. Rao, “Mechanical vibrations fifth edition in SI units,” PEARSON, pp. 718-727, (2012).
- [5] J. H. Lee, “Experimental study of beam and plate large deformation,” Pusan Univ., pp.16-45, (2003).
- [6] Alipour, A., Zareian, F., “Study Rayleigh damping in structures; unceratinties and treatments,” In Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, Chin, (2008).
- [7] 東京: 東京電力, “送電設計の手引,” (1980).

(접수: 2017.10.16. 수정: 2017.11.16. 게재확정: 2017.11.24.)

## 참고문헌

- [1] Y. S. Kim, “Study on the vibration and countermeasure of the processing transmission line,” Hanyang Univ., pp. 24-64, (2008).
- [2] J. R. Koo, Y. C. Bae, D. Y. Lee, H. S. Kim, S. M. Son, D. H. Kim, “Protection method of ice and snow failure at the power transmission