

<논 문>

6도체방식 송전선로의 서브스판진동 해석에 관한 연구

A study on Subspan Oscillation Analysis of 6 Bundle Conductor Transmission lines

이 형 권*
Hyung-Kwon Lee

(1996년 12월 30일 접수; 1997년 9월 20일 심사완료)

Key Words : Subspan Oscillation(서브스판진동), Line Vibration(선로진동), Spacer Damper(스페이서댐퍼), Transmission Line(송전선로)

ABSTRACT

The subspan oscillation is the most important in bundled transmission lines, which can cause conductor damage and transmission line hardware failures. So it is necessary to analyze the subspan oscillation in details for transmission lines. This paper suggests the basic concept and theoretical analysis method of subspan oscillation for 6 bundle conductor transmission line, which considers wind speed, subspan length and conductor tension. Especially this paper uses a spacer damper model with clamp-arm flexibility and damping characteristics. Theoretical analysis results are proposed.

1. 서 론

나날이 증가하는 전력수요로 인해 송전전압은 초고압화가 되어 가고 있으며, 이에 따라 송전선로의 도체구성도 코로나소음 및 송전용량 측면에서 다도체화가 되어가고 있다. 다도체방식은 송전선로에서 한 상당 전선의 가닥수를 여러개로 구성하는 방식을 뜻하는 것으로서, 다도체방식을 적용하면서 부터 단도체방식 송전선로에서는 없었던 새로운 유형의 진동현상인 서브스판진동이 발생하게 되었다. 서브스판진동은 송전선로에서 소도체간의 간격을 유지시키고 전선의 진동을 억제시킬 목적으로 설치되는 스페이서댐퍼(spacer damper)간에서만 발생하는 소도체의 진동현상이다^(1,2). 서브스판진동은 송전선로의 전선에 피로현상을 일으켜서 전선의 단선사고를 유

발시키며 선로금구나 애자련 금구에 피로 또는마모 현상을 초래하여 결국에는 전기적인 대형사고가 발생할 수 있는 매우 중요한 송전선로 진동현상중의 하나이다⁽³⁾.

서브스판진동으로 인한 도체의 단선사고를 방지하고 각 소도체간의 간격을 일정하게 유지시킬 목적으로 초창기에는 스페이서(rigid spacer)를 주로 공간내에 설치하였으나 스페이서는 뎀핑특성이 없고, 단순한 구조인 관계로 전선을 보호하는데는 어려움이 있었다. 이와같은 문제를 해결하기 위해 개발된 것이 스페이서댐퍼이다. 스페이서댐퍼는 뎀핑특성을 갖고 있기 때문에 보다 쉽게 진동으로 부터 전선을 보호할 수 있어 현재에는 대부분 다도체방식 송전선로에 스페이서댐퍼를 설치하여 운용하고 있다. 국내는 현재 지속적인 전력수요를 충족시키기 위해 향후 송전선로의 소도체구성을 정 6각형 형상의 6도체방식을 채택하는 방안을 이미 결정하였다⁽⁴⁾. 이에 따라 본 연구에서는 6도체방식 송전선로에서 발

* 정회원, 한국전기연구소 선로성능연구팀

생되는 서브스판진동을 해석하기위한 기법을 제시하였으며, 이의 기법을 이용하여 6도체방식 송전선로의 서브스판진동 특성을 이론적으로 분석하였고, 이의 결과를 통해 향후 6도체방식 송전선로의 서브스판진동 억제를 위한 기본방안도 제시하여 보았다. 특히 본 연구에서 제시한 해석기법은 기존방법 즉, 스페이서댐퍼의 크럼프암(clamp arm)은 전선의 진동방향에 대해 유연성이 없고 댐핑특성도 없는 단순한 스페이서로 모의하여 해석하는 방법^(5,6)과는 달리 스페이서댐퍼 크럼프암의 유연성과 댐핑특성을 고려하여 보다 정확한 서브스판진동 해석을 시도하였다.

2. 서브스판진동 개요 및 발생원리

다도체방식 송전선로에서 서브스판진동은 Fig.1과 같이 풍상측 도체(windward conductor)에 의해 풍하측 도체(leeward conductor) 주위에서 생기는 공기역학적 차폐효과로 인해 풍속이 감소된 영역 즉, 풍상측 도체의 후류역(wake)으로 인해 풍하측 도체에 양력이 발생되고, 이 양력에 의해 풍하측 도체가 진동을 하게 되며 이 진동에너지는 스페이서댐퍼를 통해 풍상측 도체로 전달됨에 따라 풍상측 및 풍하측 도체 전체가 진동하는 현상이다. 서브스판진동은 일반적으로 풍속이 7~18(m/s)범위에서 발생하며, 스페이서댐퍼와 스페이서댐퍼 사이에서 한 두 개의 루프(loop)를 형성하면서 풍상측 도체와 풍하측 도체간에 180°의 위상차를 갖고 타원 궤도를 그리며 운동하는 것이 특징이다.

후류역내에서 풍하측 도체가 진동하는 것은 도체에 작용하는 힘 때문인데, 이는 바람에 의해 도체에 진동에너지를 공급하는 공기역학적인 힘(aerodynamic forces)과 진동에너지를 소비하는 공기역학적인 감쇠력 때문이고, 도체에 가해지는 공기역학적인 힘은 다시 풍향과 평행인 항력성분(drag component)과 수직인 양력성분(lift component)으로 나누어진다.

항력은 바람이 진행하는 방향으로 풍향과 평행하게 도체에 작용하는 공기역학적인 힘으로서 풍상측 도체는 도체의 크기, 표면의 거칠기 및 레이놀즈수(Re) 등에 의해 결정되는 항력을 받게 되는데, 이때 도체 단위길이당에 작용하는 항력을 K. R. Cooper⁽⁷⁾는 다음과 같은 실험식으로 제시하였다.

$$D = \frac{\rho_a V^2 d}{2} C_D \quad (1)$$

여기서 ρ_a 는 공기밀도, V 는 도체에 유입되는 풍속,

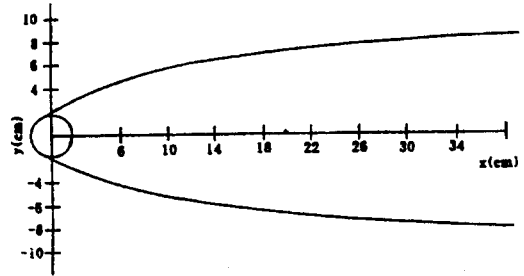


Fig.1 Typical location of wake boundaries (from wind tunnel tests)

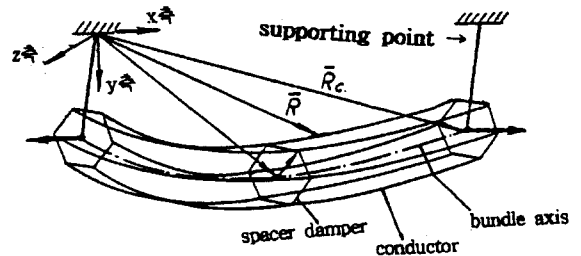


Fig. 2 Calculation model of 6 bundle conductor transmission line

d 는 도체의 외경이며 C_D 는 항력계수이다. C_D 는 레이놀즈수의 함수로서 도체표면이 전선과 같이 매끈하지 않은 경우에는 풍속에 따라 변하는 것으로 알려지고 있다.

도체도 풍상측 도체와 같은 항력을 받게 되는데 이의 크기는 레이놀즈수(Re)와 후류역내에서 풍하측도체의 위치에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$D = \frac{\rho_a V_L^2 d}{2} C_{D0} \quad (2)$$

여기서 V_L 은 후류역내의 풍속이며 C_{D0} 는 후류역 내에서의 항력계수이다.

풍하측 도체에 작용하는 양력은 후류역내에서 도체를 풍향의 수직방향으로 움직이게 하는 공기역학적인 힘으로서 식 (1)과 마찬가지로 도체 단위길이당 작용하는 양력은 다음과 같이 구할 수 있다⁽⁷⁾.

$$L = \frac{\rho_a V_L^2 d}{2} C_L \quad (3)$$

여기서 C_L 은 후류역 내에서의 양력계수이다. 양력이 발생하는 원리에 대해서는 여러 가지의 견해가 있는데, 한 견해로 풍상측 도체에 항력을 일으킨 공기압이 후류역에서는 감소되면서 압력차가 발생하게 되는데, 이것이 풍하측 도체에 부력을 일으켜 도체를 후류역의 중앙으로 움직이게 한다는 원리이며,

또 다른 견해로는 후류역내의 공기역학력에 의해 풍하측 도체가 후류역의 아랫방향으로 이동을 하게 되면 후류역의 외부로부터 내부방향으로 유입되는 공기압에 의해 도체가 상하방향으로 움직이려는 힘을 받게 되는데 이것이 양력이라는 원리이다.

이와같은 원리를 실험에 의해 확인하는 것은 상당히 어려우며 현재로서도 정확한 양력의 발생원리에 대해서는 이견이 많은 상태이다. 어쨌든 현재로서 양력은 풍향의 수직방향으로 도체에 작용하여 도체를 상하방향으로 움직이게 하는 역할을 하는 것으로 정의되고 있다⁽⁸⁾.

3. 서브스판진동 해석 모델링

3.1 도체의 운동방정식

6도체방식 송전선로에서 각전선을 비틀림과 굽힘이 없는 유연한 전선(wire)으로 모의한 후 Fig.2와 같은 좌표계에서 전선의 미소부분 dS 를 취한후 현의 운동방정식을 이용하여 6도체의 기본적인 운동방정식을 다음과 같이 구하였다⁽⁹⁾.

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} = T \cdot \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s^2} + \bar{P} \quad (4)$$

여기서

- ρ : 전선 단위길이당 질량 (kg/m)
- \bar{R} : 좌표축상에서 전선의 위치벡터
- T : 전선의 장력 (N)
- \bar{P} : 전선에 가해지는 단위길이당 외부력(N/m)

6도체방식 송전선로에서 경간의 이도(sag)는 매우 작고 선로길이에 따른 장력변동을 무시하면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= T(t) \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + P_y \\ \rho \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= T(t) \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + P_z \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

- $T(t)$: 전선의 장력변화치 (N)
- P_y, P_z : 수직 및 수평방향으로 단위길이당 전선에 가해지는 외부력(N/m)
- y : 선로의 수직방향성분 (m)
- z : 선로의 수평방향성분 (m)

송전선로에서 전선의 장력은 외부력이나 진동 등에 의해 변화되므로 Hooke의 법칙을 이용하여 각 시점에서의 장력값을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(t) = T(0) + e/a \quad (6)$$

여기서 $T(0)$ 는 전선의 초기장력(N), e 는 전선이 늘어난 길이비 그리고 a 는 도체의 탄성계수이다. 식 (5)에서 전선이 늘어난 길이비 e 값은 다음과 같다.

$$e = \frac{K(t) - K(0)}{K(0)} \quad (7)$$

여기서 $K(0)$ 는 전선의 초기길이(m), $K(t)$ 는 장력의 변화에 따른 전선 각시점에서의 길이를 의미한다.

3.2 전선에 미치는 하중

식 (4)에서 전선에 가해지는 외부력 \bar{P} 은 전선자체의 중량과 풍압 등에 의해 정해질 수 있는데, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{P} = \bar{Q} + \bar{G} + \bar{F} \quad (8)$$

여기서

- \bar{P} : 전선의 단위길이당 전체 외부력
- \bar{Q} : 단위길이당 전선의 중량
- \bar{G} : 단위길이당 전선의 피빙중량
- \bar{F} : 단위길이당 전선의 풍압

식 (8)에서 전선의 중량과 피빙중량은 송전선로 설계기준 또는 관련 규격에서 제시된 값을 이용할 수가 있으며 풍압력은 후류역에서의 공기역학적인 특성을 고려하여 계산되어야 한다. 정6각형 형상의 6도체방식 송전선로에서 상부 2도체와 중간부 2도체 및 하부 2도체 각각의 상호영향을 무시하는 것은 실제 서브스판진동 현상에서 크게 영향을 미치지 못한다. 왜냐하면 Fig. 5의 6도체 형상에서 보는바와 같이 ①번 도체의 Fig. 1과 같은 후류역 범위내에 ③번 도체와 ④번 도체가 놓이지 않기 때문이다. 따라서 풍동실험⁽⁷⁾에 의해 얻어진 다음과 같은 식을 이용하여 전선에 미치는 풍압력을 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{LW} &= 0 \\ F_{DW} &= 0.5 \rho_a \cdot V_w^2 \cdot L \cdot C_{X0} \\ F_{LI} &= 0.5 \rho_a \cdot V_l^2 \cdot d \cdot L \cdot C_Y \end{aligned} \quad (9)$$

$$F_{DI} = 0.5 \rho_a \cdot V_l^2 \cdot d \cdot L \cdot C_X \quad \text{여기서}$$

F_{DW}, F_{DI} : 풍상측 도체와 풍하측 도체에 각각 미치는 항력(N)

F_{LW}, F_{LI} : 풍상측 도체와 풍하측 도체에 각각 미치는 양력(N)

d : 전선의 외경 (m)

L : 전선의 길이 (m)

ρ_a : 공기밀도 (kg/m³)

- C_{x0} : 풍상측도체의 항력계수
- V_w, V_l : 풍상측 및 풍하측도체에
가해지는 상대속도 (m/s)
- C_x, C_y : 후류역에서 도체위치에 따라 정해
지는 양력 및 항력계수

3.3 스페이서댐퍼의 동특성

스페이서댐퍼의 장점은 전선을 잡고있는 크랩프가 Fig.3과 같은 댐핑장치(damping unit) 때문에 전선의 진동방향에 따라 어느정도 유연하게 움직이면서 진동에너지를 흡수할 수 있는 것인데, 이러한 특성은 결국 서브스판진동에 영향을 미치며 진동을 억제하는 방향으로 작용하게 된다. 따라서 이러한 특성을 고려하는 것은 보다 정확한 서브스판진동 해석을 가능케 한다.

본 연구에서는 스페이서댐퍼의 크랩프암은 전선의 방향과 전선의 수평방향으로 각각 움직일 수 있는 것으로 보아 2자유도계를 갖는 강체로 모델링하였다. 스페이서댐퍼에서 임의의 j 번째 크랩프암에 전선

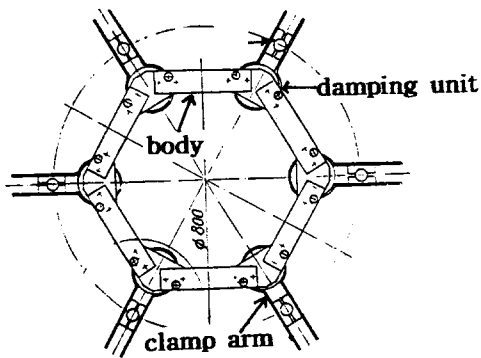


Fig.3 Configuration of a spacer damper for 6 bundle conductor transmission line

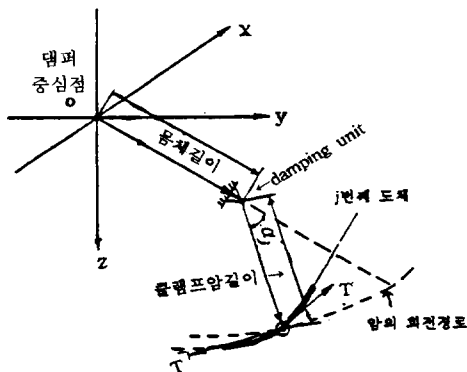


Fig.4 Calculation model of a clamp arm

으로 부터 M_{cj} 라는 힘이 가해지다면 크랩프암은 전선방향의 횡방향으로 회전하려고 하는데 이러한 특성은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$J \frac{d^2 a_j}{dt^2} + f \frac{da_j}{dt} + c a_j = M_{cj} \quad (11)$$

여기서

- a_j : j 번째 크랩프암의 회전각 (rad)
- J : 크랩프암의 관성모멘트 (kg·m²)
- f : angular viscous rigidity(N·m·s/rad)
- c : angular elastic rigidity(N·m/rad)
- M_{cj} : 전선으로 부터 j 번째 크랩프암에 가해지는 모멘트(N·m)

식 (11)에서 j 번째 크랩프암에 가해지는 각 방향별 모멘트는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_{cj} = y_{aj} \Delta T_{jz} - z_{aj} \Delta T_{jy} \quad (12)$$

식 (12)에서 y_{aj}, z_{aj} 는 크랩프암과 몸체(body)가 연결된 부분 즉, 댐핑장치의 중심점을 기준으로 j 번째 크랩프의 위치를 나타내며 $\Delta T_{jz}, \Delta T_{jy}$ 는 전선으로 부터 j 번째 크랩프암에 가해지는 각방향별 힘을 나타낸다.

또한 전선의 진동으로 부터 j 번째 크랩프암에 힘이 가해지게 되면 크랩프암은 스페이서댐퍼의 중심방향으로 힘을 받게 되며, 이힘은 몸체와 크랩프암의 연결부인 댐핑장치에 가해지게 되는데 이때의 힘은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_j = M_a \frac{d^2 \Delta l_j}{dt^2} + f \frac{d\Delta l_j}{dt} + c' \Delta l_j \quad (13)$$

여기서

- M_a : 크랩프내 전선을 포함한 크랩프암의 질량(kg)
- Δl_j : 크랩프암이 힘을 받음에 따라 움직인 댐핑장치의 변위폭 (m)
- F_j : 스페이서댐퍼 중심방향으로 크랩프에 가해지는 전선의 힘 (N)
- f' : 댐핑장치의 점성강도(N·s/m)
- c' : 댐핑장치의 탄성강도 (N/m)

서브스판진동에 의해 크랩프암이 움직임에 따라 6개의 크랩프를 지지하고 있는 스페이서댐퍼의 몸체는 전선의 방향을 기준으로 회전운동을 하려는 힘이 발생하게 되는데, 이러한 스페이서댐퍼 몸체의 회전운동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_b \frac{d^2 \alpha_b}{dt^2} = \sum_{j=1}^n M_j \quad (14)$$

여기서

- n : 다도체 수
- J_b : x축에 대한 스페이서댐퍼 몸체의 관성모멘트
- α_b : 스페이서댐퍼 몸체의 회전각
- $\sum_{j=1}^n M_j$: 몸체에 가해지는 회전방향의 모멘트

스페이서댐퍼의 몸체에 가해지는 회전방향 모멘트는 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n M_j = \sum_{j=1}^n c \cdot \alpha_j \quad (15)$$

또한 크램프암이 전선의 방향으로 힘을 받게 되면 몸체도 전선의 방향으로 움직이려는 힘이 발생되는데 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_b \frac{d^2 \bar{R}_c}{dt^2} = \sum_{j=1}^n \Delta \bar{T}_j + \bar{P}_b \quad (16)$$

여기서

- P_b, M_b : 스페이서댐퍼 몸체의 중량과 질량
- \bar{R}_c : 좌표축상에서 스페이서댐퍼 무게 중심점의 위치를 나타내는 위치벡터
- $\Delta \bar{T}_j$: 전선으로부터 j번째 크램프에 가해지는 힘

스페이서댐퍼의 동특성을 나타내는 수학적 모델 방정식은 식 (11), (13), (14) 및 (16)과 같이 2차 비선형미분방정식이 되며 간편한 해석을 위해 다음과 같은 함수를 정의하였다.

$$\begin{aligned} \frac{d \alpha_j}{dt} &= \alpha'_j, & \frac{d \alpha_b}{dt} &= \alpha'_b \\ \Delta l_j &= \frac{d \Delta l_j}{dt}, & \bar{R}'_c &= \frac{d \bar{R}_c}{dt} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)를 식 (11), (13), (14) 및 (16)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d \alpha'_j}{dt} &= \frac{1}{J} M_{c_j} - \frac{1}{J} (f \alpha'_j + c \alpha_j) \\ \frac{d \alpha'_b}{dt} &= \frac{1}{J_b} \sum_{j=1}^n M_j \\ \frac{d \Delta l'_j}{dt} &= F_j - \frac{1}{M_a} - (f \Delta l'_j + c' \Delta l_j) - \frac{1}{M_a} \\ \frac{d \bar{R}'_c}{dt} &= \left(\sum_{j=1}^n \Delta T'_j + \bar{P}_b \right) - \frac{1}{M_b} \end{aligned} \quad (18)$$

스페이서댐퍼 무게중심점의 위치 \bar{R}_c 의 초기값과 α_j, α_b 의 초기각도 및 댐핑장치의 초기변위폭 등은 스페이서댐퍼의 설계치로 부터 알 수 있는 값이

며, 6도체 운동방정식의 초기조건은 서브스판진동이 발생하기 전인 정적인 상태로 볼 수 있으므로 $t=0$ 일 때 식 (4)는 다음과 같이 된다.

$$T \cdot \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s^2} + \bar{P} = 0 \quad (19)$$

도체의 운동방정식 및 식 (18)의 해는 Cauchy문제(Cauchy's problem)의 해이며, 이 해는 Euler의 수치해석법을 이용하여 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

4. 해석 및 결과

서브스판진동 해석을 위해서는 소도체구성, 전선 종류, 송전선로의 가선조건, 스페이서댐퍼의 중량 등 기본적인 해석조건이 필요한데, 본 연구에서는 보다 현실성 있는 해석을 위해 참고문헌⁽⁴⁾에 언급된 내용을 토대로 기본조건을 정하였다. 또한 참고문헌(4)에 따라 6도체의 구성도 Fig.5와 같이 정하였으며 전선의 종류로는 ACSR 480 (mm²) Cardinal로 정하여 해석하였다. 또한 바람의 방향은 Fig.5와 같기 때문에 ①번 전선이 풍상측 도체가 되며 ②번 전선이 풍하측 도체가 된다.

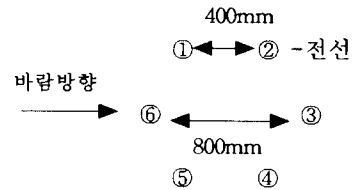


Fig. 5 Configuration of 6 bundle conductors

4.1 스페이서와 스페이서댐퍼와의 해석결과 비교

6도체방식 송전선로에 스페이서와 스페이서댐퍼가 각각 설치된 경우에 서브스판진동 현상의 차이를 보기위해 기본적인 해석조건을 이용하고 서브스판구성을 60m-60m-60m로 하여 해석한 결과는 Table 1과 같았다.

Table 1에서 스페이서가 설치된 경우에 대한 해석은 식 (11)에서 f 값은 0, $c \Delta l_j = 0$ 은 매우 큰 값 ($c \approx 100$)으로 정하고 식 (13)의 으로 하면 댐핑 특성이 없는 스페이서의 특성을 갖게 되어 이에 대한 서브스판진동 해석이 가능해진다. 그리고 서브스판진동은 후류역에 의해 발생되기 때문에 Fig. 5와 같은 소도체 구성에서 소도체 ①의 후류역이 소도체 ③과 ④에 영향을 미치지 못하기 때문에 서브스판진동 해석결과를 상부 두도체에 대해 분석하였다.

Table 1에서 스페이서댐퍼가 설치된 경우가 스페

이서가 설치된 경우보다 진동진폭이 매우 억제되어 나타남을 알 수 있으며 이로부터 6도체방식 송전선로에는 스페이서댐퍼를 설치하는 것이 서브스판진동을 억제하는데 보다 효과적임을 알 수 있다. 일반적으로 풍속이 증가함에 따라 그리고 풍상측 도체보다 풍하측 도체가 진동진폭이 크게 발생하는 것으로 관측결과^(2,3) 알려지고 있는데, 이러한 관측결과와 Table 1의 해석결과가 일치함을 알 수 있다.

4.2 조건별 서브스판진동 해석

국내의 전력수요를 충족시키기 위해 6도체방식 송전선로의 건설을 이미 확정하여 이에 대한 설계방안이 제시된 상태이기 때문에⁽⁴⁾, 이의 설계조건을 근거로 하여 해석조건을 정하면 보다 실제상황에 근접한 해석조건을 정할 수 있다. 따라서 참고문헌⁽⁴⁾에 근거하여 Table 2와 같이 해석조건을 정하였다.

Fig. 6은 Table 2의 해석조건에서 스페이서를 설치한 경우 5번째 서브스판에서의 서브스판진동 해석결과로서 같은 조건에서 스페이서댐퍼를 설치한 경우의 Fig. 7과 비교해 볼 때 진폭이 약 2배정도 차이가 나타나는 것으로 해석되었는데, 이러한 차이는 스페이서가 댐핑특성을 갖고 있지 않기 때문이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 ①은 풍상측 도체를 ②은 풍하측 도체의 진동현상을 각각 나타내며, 진동 발생 초기(0~8초 사이)의 진폭변화는 전선에 진동을 발생시키기 위해 전선에 충격하중을 가하기 때문에 나타나는 현상으로서 마치 매우 강한 바람이 순간적으로 불어 전선이 진동하기 시작하는 현상이라고 보면 된다. 따라서 실제 서브스판의 진동현상은 각 Fig.에서 약 25초 이후의 것을 보면 된다.

Fig. 8은 서브스판 길이가 50 m인 2번째 서브스판에서 발생하는 서브스판진동 현상을 해석한 결과로서 Fig. 7과 비교해 볼 때 진동진폭이 작음을 알 수 있다.

이러한 해석결과로부터 서브스판 길이에 따라서도 진동현상이 다르게 나타남을 알 수 있는데, 즉 서브스판 길이가 길수록 전선의 이도(sag)가 크기 때문에 진동진폭이 크게 발생됨을 알 수 있다. 따라서 최대 서브스판 길이를 정할 경우에는 서브스판의 진동진폭이 제약조건이 될 수 있다. 왜냐하면 최대서브스판 길이를 잘못 선정하여 전선의 수명에 영향을 줄 수 있는 큰 진폭이 발생하거나 진동시 전선간 충돌현상이 발생할 경우에는 전선에 피로가 누적되어 전선의 수명은 급격히 감소하게 되며 결국 단선사고를 초래할 수 있기 때문이다.

Fig. 9는 Table 2의 해석조건에서 피빙두께만을

Table 1 Subspan oscillation results by spacer dampers and spacers

변수변경항목		해석 결과				
No.	댐핑장치 유 무	풍속 m/s	수평방향 진동진폭(m) (peak to peak)		진동시 장력최대 변동폭 (daN)	진동 주파수 (Hz)
			풍상측 도체①	풍하측 도체②		
1	Spacer	15	0.025	0.13	30	0.93
2	Spacer damper	15	0.005	0.05	15	0.88
3	Spacer	16	0.076	0.34	50	0.92
4	Spacer damper	16	0.019	0.06	24	0.92
5	Spacer	18	0.263	0.94	67	0.96
6	Spacer damper	18	0.036	0.15	26	1.10

Table 2 Conditions of subspan oscillation analysis

	해석 조건
1. 경간 전선길이	470 (m)
2. 전선장력	18,360 (daN)
3. 스페이서댐퍼 설치 수량	8
4. 서브스판 구성	(40m-50m-60m-55m-60m-55m-60m-50m-40m)
5. 스페이서댐퍼 중량	15 (N)
6. 크래프암 길이	0.2 (m)
7. 댐퍼형식	Spacer/ Spacer damper
8. 풍 속	15 (m/s)
9. 피빙두께	0 (mm)

20 mm로 변경하여 간접적으로 전선직경을 증가시켰을 경우 나타나는 해석결과를 보기위한 것으로서 5번째 서브스판(s=60 m)에 대해 해석한 결과이다. Fig. 9로 부터 전선의 직경이 커질 수록 서브스판의 진동진폭이 크게 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 Table 2의 해석조건에서 전선장력을 30,000 daN, 풍속 18 m/s, 피빙두께 20 mm로 변경하여 매우 가혹한 환경조건에서의 해석결과를 나타낸 것으로서 진동진폭이 매우 크게 발생하였음을 알 수 있다. Table 3과 4는 Fig. 7에서 Fig. 10의 해석결과를 풍하측 도체인 ②번 도체에 대해 수치화 한 것으로서 각 결과치는 6초간의 계산시간중에서 가장 큰 값을 나타낸 것이다. Table 3과 4로부터 전선에 피빙현상이 발생되면 전선의 장력과 전선의 직경이 커지는 효과가 생겨 서브스판진동이 보다 쉽게 발생이 되며 진동진폭도 크게 발생되

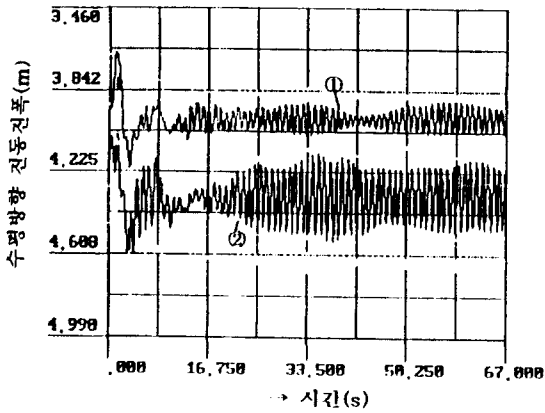


Fig.6 Subspan oscillation result of upper two conductors in 5th subspan(s=60 m) with rigid spacers

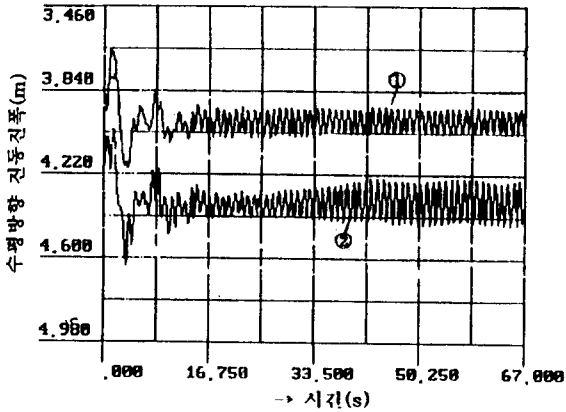


Fig. 7 Subspan oscillation result of upper two conductors in 5th subspan(s=60m) with spacer dampers

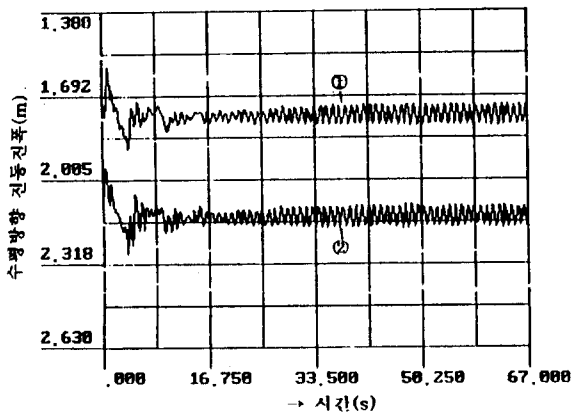


Fig. 8 Subspan oscillation result of upper two conductors in 2nd subspan (s=50m) with spacer dampers

Table 3 Calculation results from Fig. 7 and Fig. 8

Maximum values of subconductor ② in subspan number 2						
Time interval(s)	24-30	30-36	36-42	42-48	48-54	54-60
수평방향 진폭(m)	0.0321	0.036	0.0362	0.0382	0.0371	0.0376
수직방향 진폭(m)	0.006	0.005	0.004	0.0035	0.0045	0.0035
스페이서델타하중(daN)	14.4	16.8	16.6	17.8	18.1	16.1
장력변동치 (daN)	8.0	7.5	6.5	5.5	5.5	5.5
Maximum values of subconductor ② in subspan number 5						
Time interval(s)	24-30	30-36	36-42	42-48	48-54	54-60
수평방향 진폭(m)	0.061	0.076	0.0915	0.096	0.097	0.097
수직방향 진폭(m)	0.07	0.07	0.06	0.06	0.055	0.055
스페이서델타하중(daN)	15.4	13.2	13.0	12.2	12.9	12.5
장력변동치 (daN)	8.0	7.5	6.5	5.5	5.5	5.5

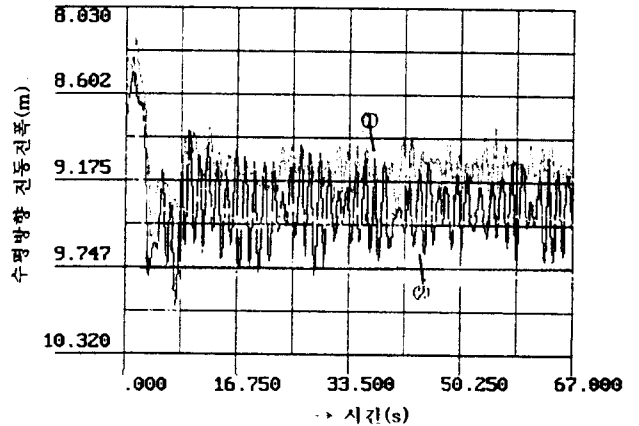


Fig. 9 Subspan oscillation result of upper two conductors in 5th subspan(s=60 m) with spacer dampers and ice deposit 20 mm

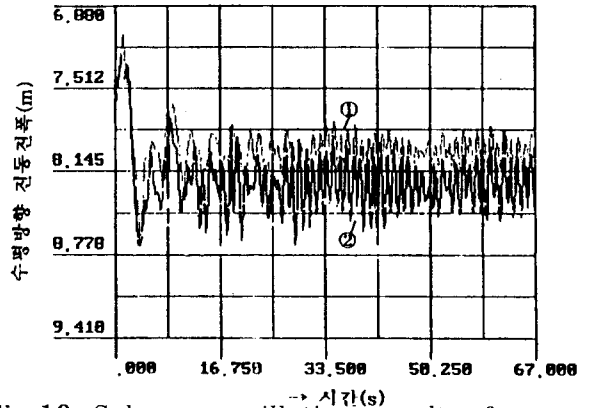


Fig.10 Subspan oscillation result of upper two conductors in 5th subspan(s=60 m) with spacer dampers(ice deposit 20 mm, wind speed 18m/s, tension 30,000 daN)

Table 4 Calculation results from Fig. 9 and Fig. 10

Maximum values of subconductor ② in subspan number 2						
Time interval(s)	24-30	30-36	36-42	42-48	48-54	54-60
수평방향 진폭(m)	0.1715	0.1725	0.1315	0.212	0.183	0.186
수직방향 진폭(m)	0.081	0.081	0.065	0.085	0.07	0.072
스페이서댐퍼하중(daN)	106.1	89.4	84.5	104.8	95.7	81.8
장력변동치 (daN)	27.0	27.0	22.0	18.5	17.5	25.0
Maximum values of subconductor ② in subspan number 5						
Time interval(s)	24-30	30-36	36-42	42-48	48-54	54-60
수평방향 진폭(m)	0.4405	0.3135	0.2960	0.3735	0.3375	0.3055
수직방향 진폭(m)	0.15	0.13	0.07	0.14	0.17	0.14
스페이서댐퍼하중(daN)	115.7	96.7	81.5	51.3	81.1	67.8
장력변동치 (daN)	27.0	27.0	22.0	18.5	17.5	25.0

어 스페이서댐퍼에 미치는 하중이 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 수직방향 진폭도 커져 전선이 타원형을 그리면서 진동하는 것으로 해석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 스페이서댐퍼 크래프암의 유연성과 이의 댐핑특성을 고려한 6도체방식 송전선로의 서브스판진동 해석기법을 제시하였고 이의 기법을 이용하여 국내에서 향후 운용될 예정인 6도체방식 송전선로에 대한 서브스판진동 특성을 해석하여 보았다. 본 연구의 주요 분석결과 및 서브스판진동 억제제를 위한 기본방안으로서 다음과 같이 제시할 수 있다.

(1) Table 3과 4의 해석결과와 더불어 여러 가지의 예상되는 실선로 조건에 대한 서브스판진동 현상에 대한 시뮬레이션 결과 피빙현상이 없고 전선의 장력도 20% UTS 범위인 경우에는 서브스판진동시 스페이서댐퍼에 40 daN 이하의 하중이, 피빙상태 및 20%UTS 이상인 경우에는 크래프암당 약 120 daN 이하의 하중이 가해질 수 있는 것으로 나타났으며, 이는 향후 6도체용 스페이서댐퍼의 주요 설계 자료로 이용될 수 있다.

(2) 6도체방식 송전선로에는 스페이서보다 스페이서댐퍼를 설치해야 진동진폭이 억제되고 이에따라 장기적인 전선의 수명을 확보할 수 있는 것으로 해석되었다. 따라서 6도체방식 송전선로에서 보다 높

은 송전신뢰도를 확보하기 위해 스페이서댐퍼를 설치하는 것이 바람직하다.

3) 시뮬레이션 결과 서브스판진동 현상은 서브스판길이, 장력, 풍속, 전선두께가 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4) 서브스판진동 발생시 전선의 장력변동폭은 서브스판에 따라 다르게 나타나지만 시뮬레이션 결과로는 약 40 daN 이하의 범위인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) C.O. Frederick, M. D. Rowbottom, 1969, "Subspan Oscillation", CIGRE Working Group document No.22-69 (WG02).
- (2) C. F. Sarkinen and J. T. Witala, 1996, "Subspan Galloping Ease on Lines" Electrical World, 15.
- (3) V. S. Davey, 1972, "Reducing Conductor Vibration Using Spacer Dampers", Electrical Times.
- (4) KEPCO, 1994, "765 kV 절연설계지침 및 해설서".
- (5) I. P. Smith, 1967, "The Aeroelastic Stability of Twin Bundled Conductors", CERL Laboratory Report.
- (6) G. Diana, M. Gasparetto, 1972, "Energy Method for Computing the Amplitude of vibration of Conductor Bundles due to Wake Effect", L'Engergia Elettrica, No.8.
- (7) K.R.Cooper, 1974, "Wind Tunnel and Analysis Investigations into the Aeroelastic Behaviour of Bbundled Conductors", IEEE Trans. Paper T74368.
- (8) EPRI, 1997 "Transmission Line Reference Book Wind Induced Conductor Motion", 1979
- (9) M.L.James, 1993, "Applied Numerical Methods for Digital Computation", University of Nebraska, Harper Collins College Publishers.
- (10) Francis B. Hildebrand, 1982, "Advanced Calculus for Application", Francis B. Hildebrand
- (11) T.Seppa, 1969, "Effect of Various Factors on Vibration Fatigue Life of ACSR'IBIS'", CIGRE Report (WG04).