

스페이스더댐퍼가 설치된 송전선의 진동 및 응력해석

김영달* 심재명* 민병욱**
 *한밭대학교 전기공학과 **한국전력공사 대전전력관리처

Vibration and stress analysis of transmission line with spacer damper

Y.D. Kim* J.M. Shim* B.W. Min**
 *Hanbat National University **KEPCO

1. 서 론

송전분야에서 사용되고 있는 자재 중의 하나인 알루미늄은 독립적인 역할과 다른 알루미늄과의 상호 보완적인 역할을 수행하게 된다. 이러한 전선 알루미늄 중 스페이스더댐퍼(spacer damper)는 다도체로 구성된 송전선로에서 각 소도체간의 간격을 유지시켜 주며, 여러 가지의 적기적·기계적 외부 요인들에 의해 발생되어진 진동에 너지로부터 파생되어지는 각종 피해로부터 전선을 보호하기 위해 적절한 간격을 두고 설치되어있다.[1~10]

이러한 스페이스더댐퍼가 설치된 송전선(도체)의 진동 및 응력을 해석하기 위하여 도체와 스페이스더댐퍼에 작용하는 외란의 영향으로 인하여 예상되는 도체 및 스페이스더댐퍼의 운동을 모델링하고 이를 해석함으로써 도체 운동의 안정성과 동적 응력 해석이 가능하며, 최종적으로 스페이스더댐퍼의 설치간격 결정에 대한 검증을 할 수 있다.[8~10]

도체에 작용하는 주요 외란은 첫째, 바람에 의한 저항력과 양력으로 전체 경간에 걸쳐 갤로핑(galloping) 운동을 일으키게 되며, 이 운동으로 도체의 꼬임이 방지될 수 있는 최대 스페이스더댐퍼의 간격을 결정한다. 둘째는 전선이 바람에 의해 수평방향으로 진동됨으로써 발생하는 소경간 진동으로 풍하측 및 풍상측 도체가 서로 충돌할 염려가 발생된다. 셋째로는 단락전자력에 의한 진동으로서 도체는 3-자유도의 운동을, 스페이스더댐퍼는 6-자유도 운동으로 모델링 되어야 하지만 양단이 고정되어 있음을 고려하여 전선의 길이방향 변위를 무시함으로써 전선은 수직방향의 2-자유도 운동을 스페이스더댐퍼는 수직방향의 2-자유도 운동과 회전운동을 고려한 3-자유도계로 모델링하여 해석하였다.

그러나 전선의 수명 예측을 하기 위해서는 기후변동에 따른 열팽창 효과, 자중에 의한 Creep효과 등의 준정적 응력변동(quasi-static stress variation)과 함께 국부적 장력변동에 의한 동적응력변동(dynamic stress variation)을 동시에 고려하여야 하기 때문에 길이방향의 운동을 고려한 모델이 적용되어야 할 것으로 사료된다.[11~13]

따라서 여러 원인에 의해 발생되어진 진동현상의 결과에 의해 전선의 소손 또는 단선 등으로 진전되는 사고과급의 방지 및 유지보수의 어려움 등을 충분히 감안하여 최적의 요소기술을 구현하는 것이 가장 중요하므로 스페이스더댐퍼를 각 소도체 간의 전류분포 특성, 단락전자력 특성, 미풍진동 특성, 소경간 진동 특성, 정하중 특성 등을 감안하여 최적의 설치 간격을 정립하기 위하여 우선 스페이스더댐퍼가 설치된 송전선의 진동 및 응력에 대하여 해석하였다.

2. Spacer 댐퍼의 진동특성

Spacer 댐퍼의 강도설계 기준을 결정하기 위해서는 각각의 역학적 강도(physical strength), 단락전자력

강도(short-circuit electromagnetic force strength), 소경간 진동(subspan oscillation strength)에 의한 강도 및 기타 강도 등에 대해서 개별 검토를 실시하여야 한다.

따라서 송전선로에서 스페이스더댐퍼에 가해질 수 있는 하중이나 피로현상은 여러 가지가 있으며 이들에 대한 각각의 특성은 다음과 같다.[14~16]

2.1 미풍 진동

미풍진동 현상은 0.5~7[m/sec] 이하의 약한 풍속시 발생되며, 진동시 진폭의 크기가 작으며, 주파수가 큰 것이 특징으로서 각종 진동현상 중에서 단도체 및 다도체 구분 없이 가장 광범위한 발생빈도를 보이고 있다.

또한 전선으로 하여금 피로 및 마모를 유발시키며, 스페이스더댐퍼 클램프의 볼트를 이완시켜 클램프에 연결된 전선을 손상시키거나 단선 시킬 수 있으며, 전선 표면이 거칠고, 직경이 크고, 풍속이 클 경우에 발생하는 정도는 보다 심한 것으로 알려져 있다.

2.2 소경간 진동

소경간 진동은 2도체에서 고장전류에 의한 진동과 후류역(wake induced)에 의한 진동이며, 다도체에서는 송전선로에서 풍상측 도체(windward conductor)에 의해 풍하측 도체(leeward conductor)의 주위에서 생기는 공기역학적 차폐효과, 즉 풍상측 도체의 후류역에 의해 풍하측 도체에 양력(lift)이 발생되고, 이 양력에 의해 풍하측 도체가 진동을 하게 되며, 이 진동에너지는 스페이스더댐퍼를 통해 풍상측 도체로 전달됨에 따라 풍상측 및 풍하측 도체 전체가 진동하는 현상이다. 발생 Mechanism은 풍상측 도체의 공기역학적인 차폐효과로 인하여 풍하측 도체가 진동을 하게 되면, 스페이스더댐퍼를 통하여 풍상측 도체에 전달을 되어 두 도체간에 소경간 진동현상이 발생된다.

이 진동현상의 진폭 크기는 후류역에 의한 진동에 기인한 것으로서 매개변수는 크게 전선의 직경, 도체의 간격 및 풍속 등에 따라 결정된다.

일반적으로, 다도체 선로에서 소경간 진동현상이 발생되기 시작하는 풍속은 8[%] 이상이며, 스페이스더댐퍼 사이에서 1 ~ 2개의 루프를 형성하면서 풍상측 도체와 풍하측 도체간에 180°의 위상차를 갖고 타원 궤도를 그리며, 그림 2.2 와 같이 진동하는 것이 특징이다.

2.3 갤로핑 진동

갤로핑 진동은 일반적으로 겨울철에 송전선에 착빙 또는 축설 되었다가 주위온도의 증가나 증량 증가현상에 따라 낙빙 또는 낙설 되었을 때 전선은 반작용에 의해 선로와 같은 방향으로의 진동과 수직 방향으로의 진동현상으로 나타난다. 이때, 전선의 외부 단면은 비대칭 구조의 불규칙한 형상을 가진다. 이러한 비대칭 구조는 저그러진 원형 구조에서 타원형 구조 또는 심지어는 고드름 형태의 장방형 구조에 이르기까지 그 형상은 다양하며, 이러한 이유로 더욱 진동발생이 심화된다.

또한 갈로핑 현상이 발생될 때 수평풍이 도체에 일정한 각도로 입사되면 전선에 양력이 발생되어 전선의 자중과 결합되어 진동 요인으로 작용한다.

발생 Mechanism은 일정한 속도의 수평풍에 대하여 전선이 일정한 속도로 수직 진동하는 경우에 전선에 인가되는 바람은 수평선과 일정한 각도로 입사되며, 드물게는 전선이 착빙 또는 착설 되지 않은 상태에서도 발생하는 경우도 있는 것으로 보고되고 있다.

이러한, 갈로핑 진동은 도체의 외경이 클수록, 경간의 정도, 전선 지지점의 지지형태 및 장력 등에 의해 발생 빈도가 빈번하며, 다른 진동현상과 비교하여 특징적인 것은 저주파 특성을 가지고 있다는 것이다.

갈로핑 진동 발생시 파급되는 사고의 유형은 작게는 스페이스 덤퍼의 체결부에서 전선의 Slip(회전 방향성) 현상과 Creep 신장이 발생되어 국부적인 파로와 마모의 단계를 거쳐 도체간의 상간 단락사고, 단선사고, 영구적인 손상 등을 유발할 수 있다.

특히, 갈로핑 진동은 진동 진폭이 커서 금구류에 미치는 영향이 큰 것으로 알려지고 있다. 송전선로에서 갈로핑 진동이 발생하면 스페이스 덤퍼가 파손될 수 있으며, 클램프의 이완 현상도 초래할 수 있다.

갈로핑 진동이 심하게 발생하는 지역으로 예상될 경우에는 별도의 갈로핑 진동 대책을 세워야 한다.

2.4 단락전자력 특성

단락전자력은 송전선로에서 평행한 두 도체간에 단락 또는 지락사고가 발생하였을 때 고장전류에 의해 다도체의 중심방향으로 각 소도체가 흡인되는 현상으로서, 이때 소도체가 상호 충돌되면서 전선 표면을 손상시킬 수 있으며, 스페이스 덤퍼의 몸체 및 덤퍼부 등을 파손시킬 수 있는 현상으로서 정확한 강도를 계산하여 설계시 반영하는 것이 중요하다. 그러나 대부분의 역학적 강도 설계시에는 단락전자력에 의해 요구되는 강도에 의해 좌우되므로 단락전자력에 의해 만족되는 설계강도를 적용한다면 기타 진동에 의한 강도도 충분히 만족될 수 있다.

다도체 송전방식에서는 상시 부하전류 또는 단락전류에 의해 소도체는 다도체의 중심 방향으로 끌어들이려는 흡인력이 발생하게 된다. 그런데 상시 부하전류에 의한 흡인력은 크지 않기 때문에 문제가 되지 않으나 지락 사고 또는 단락 사고시에는 막대한 양의 고장전류가 흐르기 때문에 소도체간에는 상당한 흡인력이 발생하게 된다.

3. 진동현상의 수학적 Modeling을 통한 해석기법

이 연구는 Simpson의 해석기법, 강제모드 해석기법, 다-자유도 해석기법 등이 있다.

3.1 Simpson의 해석기법

I. P. Smith의 해석기법을 Alan Simpson은 2-자유도계로 정의화시켜 분석모델로 풍상측 도체가 고정된 경계조건을 적용하여 해석하였다. 그림 3.1 과 3.2 는 이러한 해석기법을 적용하기 위해 Modeling한 것과 실제 해석결과를 형상화한 것이다.

해석 결과는 주파수 동기화뿐만 아니라 모든 에너지 효과를 설명할 수 있으며, 공기의 탄성결합력과 기계적 결합력을 선형적으로 해석함으로써 계의 안정도와 성능을 평가하기에 적합하여 공기역학적 감쇠행렬식(aerodynamic damping matrix)이 이용되며, 정풍동(static wind tunnel) 시험에서 항력계수(drag coefficient ; C_D)와 양력계수(Lift coefficient ; C_L)를 적용하여 역학적 안정도의 여부를 예측할 수 있다.

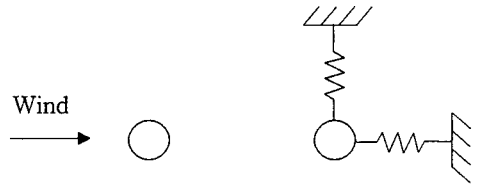


그림 3.1 후류역에 대한 스프링 시스템

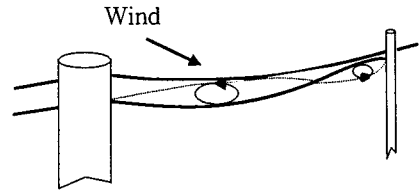
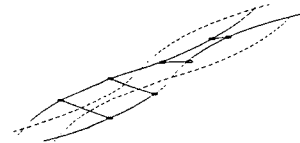


그림 3.2 풍하측 전선의 소경간 진동의 형상화

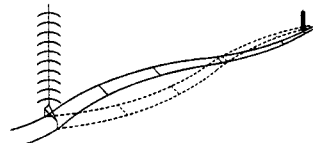
3.2 강제모드 해석기법

Simpson과 Lawson은 착빙된 도체의 갈로핑 진동을 해석하기 위해 각각 1-자유도로 비틀림 진동과 수직 갈로핑과 수평 갈로핑 진동을 비감쇠 정상모드로 표현하는 기법을 강제모드 해석기법(rigid body mode analysis)이라 한다.

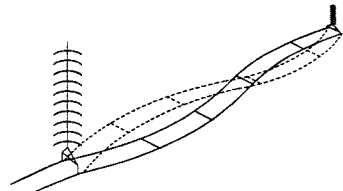
이 해석기법은 선형적이며, 다도체가 양쪽에 설치된 첩탑에 지지되어 소진폭 내에서 진동되는 경우에는 정확한 해석이 가능하며, 나선일 경우에도 적용 가능한 것으로 보고되고 있다. 그림 3.3 은 강제모드 해석기법을 적용한 그림을 도시한 것이다.



(a) 비틀림(Rolling or twisting) 진동



(b) 수직(Vertical) 갈로핑



(c) 수평(Horizontal) 갈로핑

그림 3.3 강제모드의 종류

3.3 다-자유도 해석기법

앞선 해석기법들은 진동현상이 모든 소도체가 자유로운 다도체의 소구획에 존재하는 것으로 Modeling하였다. 그러나 345kV 이상의 송전선로는 4-자유도계 이상

이기 때문에 다-자유도에 의한 진동해석기법이 요구된다. 이러한 해석기법은 Ko 에 의해 4도체에 처음으로 Modeling을 시도하였으며, 그림 3.4 에서 볼 수 있듯이 4도체 소구획이 다양한 스프링 정수와 몸체로 독립적인 스프링계로 Modeling하여 해석하였다.

또한 이 해석기법은 몸체는 비틀림 진동과 수직 겔로 평과 수평 겔로평내에서 다도체의 운동이 가능하기 때문에 6도체까지 해석영역을 확장하여 적용이 가능하지만, 다도체내 에너지 전이에 대해서는 모의하지 못한다는 것이 문제점으로 제기되고 있다.

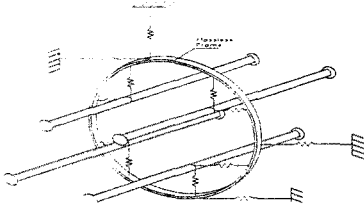


그림 3.4 다-자유도 해석을 위해 적용된 수학적 Modeling의 형상

4. 스페이스 댐퍼의 진동 및 응력 해석

4.1 도선 운동의 지배 방정식

도선 운동에 대한 일반식을 유도하기 위하여 그림 4.1 과 같은 모델을 설정하였다. 도선의 양단 지지부 사이의 간격은 l 이며, 도선 길이 방향의 변위는 $u(x, t)$, 수평방향 및 수직방향 변위는 $v(x, t)$ 와 $w(x, t)$ 이라고 하자.

도선의 시작점은 고정되어 있으므로 $x=0$ 이라 하고, 다른 한 끝단 ($x=l$) 은 y, z 방향의 변위가 발생하지 않도록 고정되어 있으나, x 방향으로의 미끄러짐이 가능한 계이며, $x=l$ 에서 장력 T 가 작용하고 있다고 본다. 또 도선의 단위 길이당 질량은 ρ 이며, Young's Modulus는 E , 단위면적은 A 라고 한다.

도선의 축방향 변위 $u(x, t)$ 에서 미소길이 ds 는 다음 식(4-1)과 그림 4.1과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} ds = -\frac{\partial T}{\partial s} ds \quad \text{또는,} \quad (4-1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial T}{\partial s}$$

도선 길이 방향의 변위 $u(x, t)$ 가 발생함에 따른 단면 수축을 무시하면(즉, Poisson 비 $\nu=0$) 장력 T 는

$$T = EA \epsilon_x \quad (4-2)$$

가 된다. 축방향 변형률 ϵ 은 온도 변화에 따른 열 팽창 변형률 ϵ_T 를 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_x + \epsilon_T \quad (4-3)$$

여기서, $\epsilon_T = \alpha \Delta T$ 이며, α 는 열팽창계수, ΔT 는 온도변화이며, 기후 변화는 시간에 따라 급변하지 않으므로 ϵ_T 는 상수로 취급한다.

식(4-3)의 변형률 ϵ 은 축방향 변형률로서

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial s} \quad (4-4)$$

이며, 식(4-2), (4-3) 및 (4-4)로부터 장력은

$$T = EA \left(\frac{\partial u}{\partial s} - \epsilon_T \right) \quad (4-5)$$

가 되며, 이를 식(4-1)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = EA \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} \quad (4-6)$$

여기서,

$$ds = (1 + \epsilon) dx \quad (4-7)$$

이므로, 식(4-7)을 식(4-6)에 대입하면

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{EA}{(1 + \epsilon)^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-8)$$

이 되며, $\epsilon \ll 1$ 이기 때문에 ϵ^2 을 무시할 수 있어

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{EA}{1 + 2\epsilon} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-9)$$

의 식을 얻을 수 있다. 또한 축방향 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (4-10)$$

시간과 위치에 따라 변화하는 동적 탄성계수 E' 을

$$E'(x, t) = \frac{E}{1 + 2\epsilon(x, t)} = \frac{E}{1 + 2\epsilon_T + \frac{2T(x, t)}{EA}} \quad (4-11)$$

와 같이 정의하면, E' 은 장력 T 의 함수로 표현된다.

따라서, $v(x, t)$ 및 $w(x, t)$ 에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T(x, t) \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} \right) + P_y(x, t) \quad (4-12)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T(x, t) \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \right) + P_z(x, t) \quad (4-13)$$

최종적으로 도선의 축방향 변위가 고려되는 일반적인 경우에 도선의 지배 방정식은

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{EA}{1 + 2\varepsilon_T + \frac{2T}{EA}} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-14)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4-15)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (4-16)$$

가 되며, 장력 T 는 $T(x, t)$ 로 시간과 공간상에서 변수로 취급된다.

4.2 스페이스 댐퍼의 운동방정식

경간 거리 l 인 도선에 N 개의 스페이스 댐퍼가 설치된 계를 고려해 본다. 그림 4.3 과 같이 스페이스 댐퍼는 4도체를 기본으로 고려한다.

i 번째 스페이스 댐퍼를 고려하면 스페이스 댐퍼는 6-자유도의 강체 운동이 가능하므로 일반적인 스페이스 댐퍼의 운동 방정식은 스페이스 댐퍼 무게 중심점의 직선 운동 변위 $u_G^i(t)$, $v_G^i(t)$, $w_G^i(t)$ 에 대하여 다음과 같이 표현할 수 있다. 이를 그림 4.4 에 나타내었다.

$$M_i \ddot{u}_G^i(t) = \sum_{j=1}^4 (T_j^{i+1} - T_j^i) + P_x^i \quad (4-17)$$

$$M_i \ddot{v}_G^i(t) = \sum_{j=1}^4 \left[T_j^{i+1} \frac{\partial v_j^{i+1}}{\partial x_{i+1}} \right]_{x_{i+1}=0} - T_j^i \frac{\partial v_j^i}{\partial x_i} \quad (4-18)$$

$$M_i \ddot{w}_G^i(t) = \sum_{j=1}^4 \left[T_j^{i+1} \frac{\partial w_j^{i+1}}{\partial x_{i+1}} \right]_{x_{i+1}=0} - T_j^i \frac{\partial w_j^i}{\partial x_i} \quad (4-19)$$

또, 회전 운동각 $\theta_x^i(t)$, $\theta_y^i(t)$, $\theta_z^i(t)$ 에 대한 운동방정식도 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (4-20)$$

경간의 양 끝단의 x 방향 변위 $u_j(x, t)$ 가 제한된 경우에는 x 방향의 운동은 무시할 만큼 작으므로 도선의 경우 $v(x, t)$ 와 $w(x, t)$ 의 두 방향 운동만 고려하고, 스페이스의 강체 운동에 대해서는 v_G^i , w_G^i 및 θ_x^i 의 3-자유도 운동을 고려해야 한다.

4.3 4도체 스페이스 댐퍼가 체결된 경간내 전선 운동

그림 4.5 는 4도체 스페이스 댐퍼로 결합된 도선의 좌표계를 정의하고 있다.

절대 좌표 $x-y-z$ 에 대하여 도선의 좌표계 $(x_j, y_j, z_j, j=1, 2, 3, 4)$ 는 도선 간격의 $1/2$ 만큼 y 및 z 축으로 평행이동 되어있어 식(4-21)의 관계를 갖는다.

$$\begin{Bmatrix} y_j \\ z_j \end{Bmatrix} = \frac{d}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_j \\ z_j \end{Bmatrix} \quad (4-21)$$

여기서,

$$\theta_j = \frac{\pi}{4}(2j-1) \quad (4-22)$$

이며, $d = 400$ [mm] 이다.

y_j 및 z_j 축에 대한 도선의 변위는 각각 $v_j(x, t)$, $w_j(x, t)$ 로 정의 한다. 이 계는 스페이스 댐퍼의 운동이 경계 조건으로 작용하기 때문에 해석의 편의를 위해 도선의 변위를 다음과 같이 정의하며, 그림 4.6 에 나타내었다.

좌표축 x_i 는 $i-1$ 번째 스페이스 댐퍼를 기준으로 한 x 축이다.

$i-1$ 번째 스페이스 댐퍼와 i 번째 스페이스 댐퍼 사이의 도선에 대한 지배 방정식은 양단 고정의 경계조건을 적용하면 도선축 방향의 변위 $u_j^i(x, t)$ 는 무시할 만큼 작으므로 식(4-11) 및 식(4-12)의 y 및 z 방향에 대한 지배 방정식을 이용한다. 이때 장력은 x 축상에 서 일정한 값을 갖게 된다.

$$\rho \frac{\partial^2 v_j^i(x, t)}{\partial t^2} = T(t) \frac{\partial^2 v_j^i(x, t)}{\partial x^2} + P_y^i(x, t) \quad (4-23)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w_j^i(x, t)}{\partial t^2} = T(t) \frac{\partial^2 w_j^i(x, t)}{\partial x^2} + P_z^i(x, t) \quad (4-24)$$

식(4-23) 및 식(4-24)의 경계조건은 스페이스 댐퍼의 운동에 의해 결정된다. x -방향 변위를 무시하였기 때문에 스페이스 댐퍼의 강체 운동은 y , z 방향의 운동과 x 방향의 회전운동을 갖는 3자유도 운동을 하게 된다. 스페이스 댐퍼 운동에 대한 좌표축은 그림 4.7 과 같다. i 번째 스페이스 댐퍼의 y 및 z 축 운동 변위는 $v_i(t)$, $w_i(t)$ 이며, x 축에 대한 회전각은 $\theta_i(t)$ 이다.

그림 4.7 에서 스페이스 댐퍼는 y , z 축으로 $v_i(t)$ 및 $w_i(t)$ 의 직선운동이 있었으며 $\theta_i(t)$ 의 회전운동으로 $x' - y' - z'$ 의 순간 좌표축을 갖게 된다.

여기서, 스페이스 댐퍼 4 모서리에 위치한 도선의 변위 v_j^i 와 w_j^i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{v_j^i, w_j^i\}^T &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_j \\ z_j \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} \frac{d}{\sqrt{2}} \cos(\theta_i + \theta_j) + v_i \\ \frac{d}{\sqrt{2}} \cos(\theta_i + \theta_j) + w_i \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4-25)$$

스페이스 댐퍼의 운동 속도 $\dot{v}_i(t)$, $\dot{w}_i(t)$ 및 $\theta_i(t)$ 에 의해, 스페이스 댐퍼의 4 모서리 점에서의 도선의 속도 $\dot{v}_j^i(l_i, t)$, $\dot{w}_j^i(l_i, t)$ 는

$$\dot{v}_j^i = \dot{v}_i - \frac{d}{\sqrt{2}} \dot{\theta} \sin(\theta + \theta_j) \quad (4-26)$$

$$\dot{w}_j^i = \dot{w}_i - \frac{d}{\sqrt{2}} \dot{\theta} \sin(\theta + \theta_j) \quad (4-27)$$

이 된다.

i 번째 스페이스 댐퍼의 기하학적 접합성을 고려하면 다음과 같다.

$$\dot{v}_j^i(l_i, t) = \dot{v}_j^{i+1}(0, t) \quad (4-28)$$

$$\dot{w}_j^i(l_i, t) = \dot{w}_j^{i+1}(0, t) \quad (4-29)$$

여기서, $j = 1, 2, 3, 4$ 일 경우의 경계 조건을 얻는다.

i 번째 스페이스 덤퍼의 운동 방정식은 식(4-17)~식(4-20)로부터

$$m_i \ddot{v}_i = \sum_{j=1}^4 Y_j^i \quad (4-30)$$

$$m_i \ddot{w}_i = \sum_{j=1}^4 Z_j^i \quad (4-31)$$

$$I_{xx} \ddot{\theta}_i = \sum_{j=1}^4 Y_j^i (w_i - w_j^i) - \sum_{j=1}^4 Z_j^i (v_i - v_j^i) \quad (4-32)$$

여기서,

$$Y_j^i = T_j \left[\frac{\partial v_j^{i+1}(0, t)}{\partial x} - \frac{\partial v_j^i(l_i, t)}{\partial x} \right] \quad (4-33)$$

$$Z_j^i = T_j \left[\frac{\partial w_j^{i+1}(0, t)}{\partial x} - \frac{\partial w_j^i(l_i, t)}{\partial x} \right] \quad (4-34)$$

가 된다.

5. 결 론

도체의 운동을 2-자유도 파동방정식(wave equation)으로, 스페이스 덤퍼는 3-자유도 (2-자유도 직선운동과 1-자유도 회전운동)로 모델링하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 풍속 10[m/sec]의 2차원 유동에 대하여 발생하는 공간 내 도체의 미풍진동, 갤로핑 진동, 서브스판 진동 등에 의해 안정상태(꼬이거나 도체간 충돌이 없는 상태)를 유지하였으며, 국부적 진동 변위에 의한 장력변동은 허용 장력의 5% 미만으로 나타났다.

2) 미풍진동, 갤로핑 진동, 서브스판 진동 등에 대하여 해석한 결과 스페이스 덤퍼의 간격에 대하여 도체간의 충돌은 없는 것으로 나타났다.

3) 각종 진동 현상에 의해 Bending Stress가 발생되기 때문에 각 선로의 충돌보다는 Bending Stress를 줄여주기 위한 스페이스 덤퍼 설치 간격을 정립할 필요성을 확인하였다.

4) 180° 회전 후의 염회복원은 45m로 스페이스 덤

퍼 간격 내에서 모두 이루어지나, 축방향 변위가 발생한 경우에 대해서는 이온 확장 후 검토할 필요가 있다.

(참고 문헌)

1. 송전설계기준, 한국전력공사
2. C. Manuzio, "An investigation of the forces on bundled conductor spacers under fault conditions", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-86, No.2, 1967.
3. M. I. Sterelyuk, I. I. Sergey, "Split phases overlapping dynamics of compact overhead power lines at short circuit", CIGRE S33 - 91, 1991.
4. IEC 1854, Ed1, "Requirements and Test for spacers," 1997.9
5. IEEE Std 563-1978, "Conductor Self-Damping Measurements".
6. IEEE Std 664-1993, "Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration dampers for Single Conductor".
7. 스페이스 부식원인분석 및 방지대책, 재천전력관리처 동해전력소, 1999. 10.
8. 한국전력공사 표준구매시방서, "스페이스(Spring Type)", 1991.1.9
9. EPRI, "Transmission Line Reference Book," 1979
10. 한국전력공사, "765kV 송전선로 6도체 스페이스덤퍼 구매시방서, 97.3
11. Ashai Electric Work, "Consideration of spacer damper", Vol. No.25, pp. 77-79, 1995. 12
12. Ashai Electric Work, "Consideration of spacer damper", Vol. No-131, 1996. 10
13. Ashai Electric Corporation, "spacer damper Specification", 1996. 12
14. A. T. Edwards and J. M. Boyd, "Bundle-Conductor spacer Design Requirements and Development of "spacer - Vibration damper", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-84, No. 8
15. M. I. Steriliuk, I. I. Sergey, "Calculation of Subspan Oscillations of Overhead Lines Split Phases," 9th International Power System Conference, 4, July, 1994.
16. M. I. Stereliuk, I. I. Sergery, "Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design.", NOTEE, 1995.

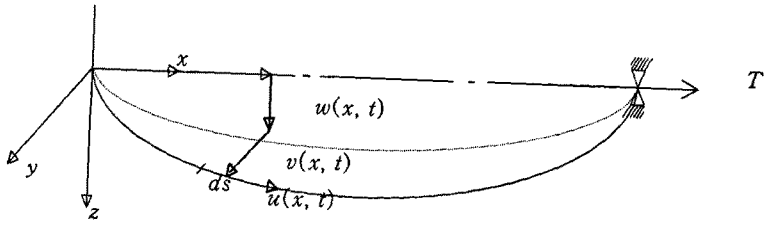


그림 4.1 도선 운동을 나타내는 좌표계

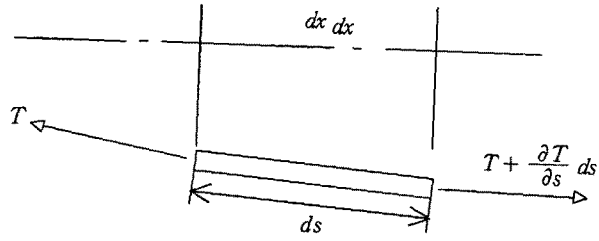


그림 4.2 축방향 변위 미소길이

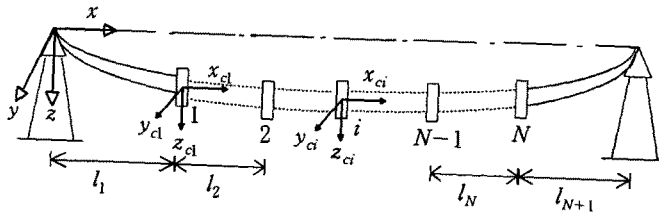


그림 4.3 4도체로 가설된 스페이서 댐퍼 형상도

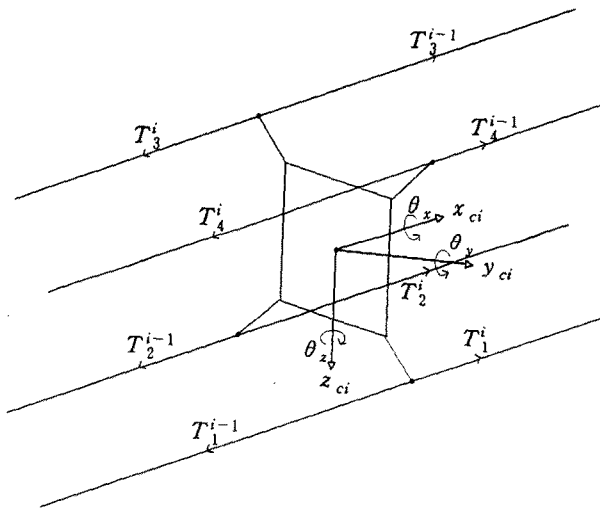


그림 4.4 스페이서 댐퍼 운동 좌표계

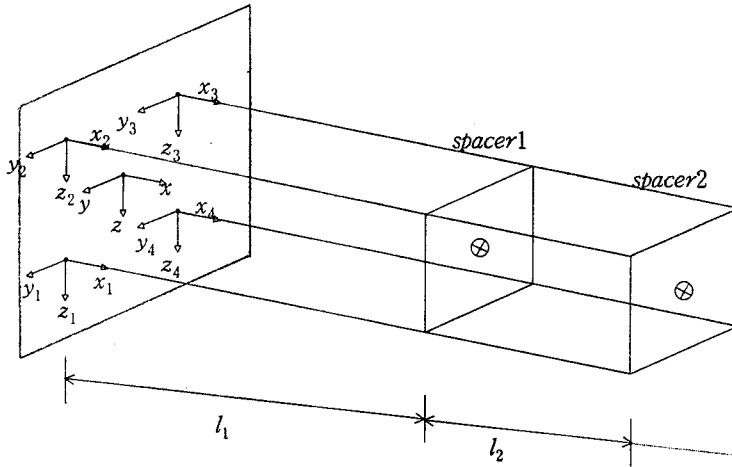


그림 4.5 4도체 스페이서 댐퍼로 결합된 도선의 좌표계

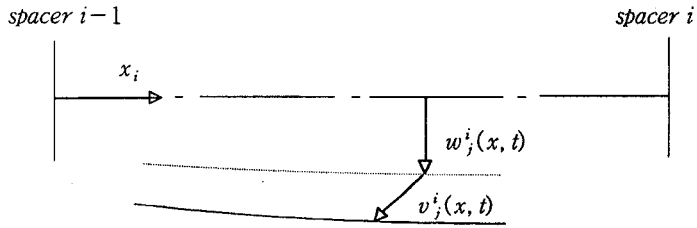


그림 4.6 도선의 변위

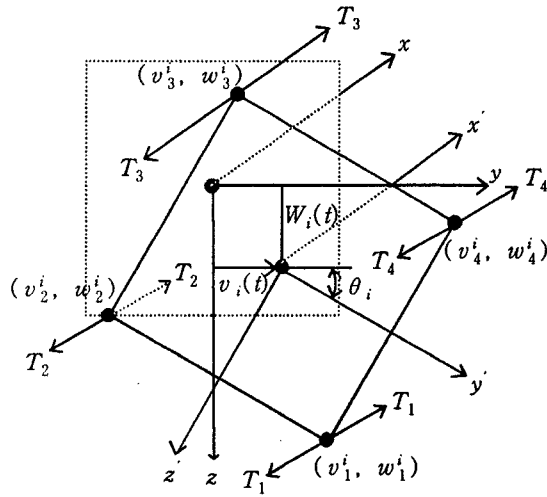


그림 4.7 스페이서 댐퍼 운동에 대한 좌표축