

## 4도체 송전선로의 진동현상 조사·분석(I)

손홍관\*, 이형권\*, 이동일\*\*, 추장희\*\*, 유철환\*\*\*  
 한국전기연구원\*, 한전전력연구원\*\*, 한전중앙교육원\*\*\*

### Observation and Analysis of the Oscillation of 4-Bundled Conductor System

H.K.Sohn\*, H.K.Lee\*, D.I.Lee\*\*, J.H.Chu\*\*, C.H.Yu\*\*\*  
 KERI\*, KEPRI\*\*, KEPCO\*\*\*

**Abstract - Abstract -** The oscillation is very dangerous in bundled transmission lines. But we have no data for oscillation phenomena in real transmission lines. In order to develop the control method of the oscillation, we need to know the amplitude and relations between winds and other conditions. So we observed and analyzed the oscillation in some 4 bundled lines, which have high failure rate. We try to suggest the oscillation phenomena of the 4 bundled lines. In the future we will try to observe and analyze the oscillation for developing protection methods of transmission lines from the oscillation.

#### 1. 서론

가공송전선로에서 흔히 발생하는 바람에 의한 진동으로는 미풍진동, 후류에 의한 진동, 갠립핑진동 등이 있다. 미풍진동은 주로 단도체 선로에서 많이 발생되고, 다도체 선로일수록 크게 줄어드는 특징이 있으며 특히 4도체 선로의 경우에는 소도체간 상호 간섭에 의해 크게 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 후류에 의한 진동은 다도체 선로에서만 발생하는 진동으로서 4도체 선로의 경우 흔히 발생하는 진동이다. 갠립핑진동은 전선 표면의 착빙이나 착설시 발생하는 진동이며, 국내의 경우 갠립핑진동에 의한 피해사례는 아직 보고된 예가 없다. 따라서 다도체 선로에서는 후류에 의한 진동이 가장 잘 발생하는 것으로 알려져 있다.

국내의 경우 지금까지 송전선로의 진동에 대해 실선로를 대상으로 관측하거나 조사 분석한 예가 없다. 그러나 스페이서덤퍼의 보수 및 사고실적을 통해 볼 때 적지않은 진동사고가 발생한 것으로 여겨지면, 따라서 이에 대한 대책이 요구된다. 본 연구에서는 이의 일환으로 4도체 송전선로에서 실제 발생하는 진동현상을 조사 분석하였으며, 향후 진동대책 수립시 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다.

#### 2. 다도체 가공선로의 진동

##### 2.1 진동현상의 종류

다도체 선로에서는 후류에 의한 진동(wake-induced oscillation)이 주로 발생되며, 이 진동은 바람을 직접 받는 풍상측(windward) 도체의 후면이 공기역학적 차폐로 인해 풍속이 감소된 영역이 발생되고, 이 영역에 위치한 풍하측(leeward) 도체의 양력발생인한 진동현상이다. 후류에 의한 진동은 그림 1과 같이 4개의 유형(mode)으로 구분되는데 (a)를 서브스판진동(subspan mode)이라 하고, 나머지 3개 진동을 강제형진동(rigid-body mode)이라고 한다. 서브스판 내에서 진동이 발생하는 서브스판진동과는 달리 강제형진동은 경간 전체에서 발생하는 진동현상이다. 강제형진동은 진동방향이 수직, 수평 및 회전방향의 자유도를 갖는 진동으로서 진동유형에 따라 수직갠립핑(vertical galloping), 수평갠립핑(horizontal galloping or snaking) 및 비틀림진동(rolling or twisting)이 있다.

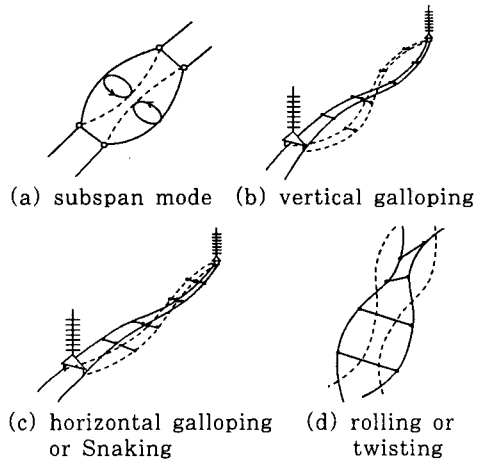


그림 1. 후류에 의한 진동의 종류  
 Fig. 1. Modes of wake-induced oscillation

서브스판진동은 스페이서와 스페이서 사이의 경간에서 1~2개의 루프를 형성하면서 풍상측 도체와 풍하측 도체의 위상이 서로 180° 차이를 갖는 타원궤적을 그리며 진동하는 특징이 있으며, 서브스판의 진폭이 클 경우에는 스페이서 클램프 또는 현수클램프의 전선지지점에 곡응력에 의한 전선의 피로현상이 누적되어 전선의 수명을 단축시키거나 단선사고를 일으킬 우려가 있다.

강제형진동은 경간 전체에 대해 한 개 또는 여러 개의 루프로 진동하며, 수직 및 수평갠립핑은 2루프 진동이 가장 일반적이고, 비틀림진동은 8루프까지 관측된 예가 보고되고 있다. 1루프 이상의 강제형진동이 발생할 경우 이 진동의 특성상 대부분 철탑의 전선지지점에 손상을 주는 특징이 있다.

##### 2.2 진동발생지역의 지형적 특징

한전의 "가공송전선로 설계지침"에서는 4도체 송전선로의 스페이서덤퍼 설치간격 적용에 있어서 진동이 매우 심하게 발생하기 쉬운 지역을 특수지역으로 구분하여 다음과 같은 지역을 고려하고 있다.

- 매우 광활한 지역
- 바다 또는 호수에 근접된 지역
- 경과지의 지형이 심한 기복이 없고 장애물이 적은 지역
- 송전선로와 직각방향으로 흠어짐이 없이 바람이 부는 지역
- 일정한 풍속의 바람이 부는 지역

지금까지의 현장조사 결과 진동의 발생이 관측된 지역의 지형적 특징은 상기 지침의 특수지역의 지형과 거의 일치하고 있으나, 지형적인 특징이 만족한다고 해서 진동이 발생하는 것은 아니며 해당경간의 진동을 일으키는 풍속과 풍향이 중요한 변수임을 알 수 있었다.

### 3. 진동현상의 조사 및 분석

#### 3.1 조사 및 분석방법

한전 각 사업소의 스페이스템퍼 보수설적과 진동현상 이 관측된 선로를 사전에 조사하여 현장을 방문한 후 진동의 발생이 빈번하고 관측이 용이한 지점을 3개소 선정하였으며, 선정된 선로에 대해 1년간 진동발생여부를 관찰하였다.

진동현상의 종류, 진폭, 진동주기, 위상을 측정하기 위해서는 진동발생이 예측되는 선로에 가속도 센서나 변위센서를 부착하여 실시간으로 측정하는 것이 정확하고, 많은 데이터를 확보할 수 있으나 실선로를 대상으로 하였기 때문에 실시간 측정은 불가능하다. 따라서 주로 주간에 바람이 많이 부는 날을 중심으로 대상선로를 방문하여 비디오 촬영을 실시한 후 화면을 통해 분석하는 방법을 사용하였다.

촬영된 동화상에 대해 진동진폭이 큰 시점이나 특이한 진동이 발생된 시점을 다음과 같이 분석하였다.

① 초당 30 프레임(flame)으로 촬영된 동화상을 초당 15 프레임으로 구분하여 화면상의 소도체간 거리를 전자 버니어캘리퍼스 측정한다.

② 약 5~6초간 측정된 약 80~90개의 데이터의 평균치가 정상상태의 소도체간 거리인 40[cm]라고 간주하고 각 측정치를 환산한다. 이때 서브스판진동은 특별한 경우를 제외하고는 서로 상대적으로 움직이는 것으로 가정하였다.

③ 환산된 값에 대해 시간 대 변위 그래프를 작성해 진동형태, 진폭, 주기, 위상 등을 분석하였다. 진폭은 원래의 소도체 위치를 기준으로 +peak 및 -peak, peak-to-peak로 표현하였다.

#### 3.2 진동발생사례

조사대상 3개 선로에 대해 촬영한 영상기록은 표1과 같다. 선로 A에서는 약간의 횡진현상만 관측되었으며, 선로 B에서는 횡진과 서브스판진동이 동시에 관측되었다. 또한 선로 C에서는 횡진이 없는 상태에서의 서브스판진동이 관측되었다. 여기서는 연구목적상 횡진보다는 서브스판진동에 초점을 맞추어 선로 B 및 C의 서브스판진동에 대해서 세부적으로 분석하였다.

표 1. 선로별 관측내용

Table 1. Summary of observed oscillations

선로명	측정일시	풍속[m/s]	관측된 진동현상
A	2001. 1. 3	-	횡진
	2001. 3. 29	-	횡진
B	2001. 2. 14	5~7	횡진, 서브스판진동
	2001. 3. 4	8~11	횡진, 서브스판진동
C	2001. 3. 7	6~8	횡진, 서브스판진동
	2001. 2. 28	3~4	서브스판진동
	2001. 3. 8	6~7	서브스판진동

#### 3.2.1 선로 B에 대한 진동현상 분석

선로 B의 진동현상 관측을 위하여 바람이 비교적 많이 부는 날을 선정해 여러 번 현장을 방문하였으나 그 중 3번만 진동현상의 관측이 가능하였다. 이하 관측된 3번의 진동현상을 각각 사례(I), (II), (III)으로 구분하여 분석하였다.

3번의 진동관측 사례 중 (I) 및 (III)은 지상에서의 풍속이 5~8[m/s]로서 서브스판진동이 매우 활발하게 발생되었으나 사례(II)의 경우 풍속이 8~11[m/s]로 매우 강하게 불었으나 진동은 오히려 미약하게 발생하였다. 진동현상은 각 시점의 약 5~6초 정도의 진동발생 시간에 대해 분석하였으며, 선로 B에 대한 진동의 종류 및 진동이 발생된 상, 진폭은 표2와 같으며, 진동형태 및 진동주기, 상하소도체간의 진동위상차, 최대진폭 발

생위치 등은 표3과 같다. 또한 분석된 진동의 파형은 그림 2 및 그림 3과 같다.

표 2. 분석시간별 진동진폭 (선로 B)

Table 2. Oscillation amplitude of analyzed intervals

구분	진동종류	상별	진동진폭(peak) [cm]				진폭 [cm]
			상선		하선		
			+peak	-peak	+peak	-peak	p-p
I-1	서브스판	B	8.919	9.033	8.193	5.502	17.952
I-2	"	A	6.137	5.306	4.456	2.397	11.443
I-3	"	A	2.116	2.474	1.847	2.882	4.590
I-4	"	B	6.297	6.400	4.838	3.576	12.697
I-5	"	A	4.036	3.554	4.458	3.898	8.356
I-6	"	A	2.789	2.143	3.522	2.845	6.367
II-1	"	B	3.882	4.624	2.926	1.823	8.506
III-1	"	A	6.488	6.425	6.678	6.686	15.364
III-2	"	A	5.850	5.754	8.392	7.832	16.224
III-3	"	A	12.357	12.629	8.236	8.107	24.986
III-4	"	A	11.483	11.517	7.352	7.394	23.000
III-5	"	A	8.428	8.816	6.668	6.895	17.244
III-6	"	A	9.021	10.131	6.318	5.822	19.152
III-7	"	A	9.077	10.160	7.461	6.669	19.237
최대진폭 [cm]			12.357	12.629	8.678	8.107	24.986

표 3. 진동현상 분석결과 (선로 B)

Table 3. Analyzed results of some oscillation

구분	상별	진동형태	주기(초)	위상차	최대진폭(p-p)	
					발생위치	진폭[cm]
I-1	B	서브스판 + 횡진	0.92	30°	상부	18.0
I-2	A		0.89	30°	상부	11.5
I-3	A		0.89	180°	상부	4.6
I-4	B		0.92	30°	상부	12.7
I-5	A		0.92	30°	상부	8.4
I-6	A		0.89	45°	하부	6.4
II-1	B	"	0.90	30°	상부	8.5
III-1	A	"	0.91	0°	하부	15.4
III-2	A		0.96	30°	하부	16.3
III-3	A		0.92	45°	하부	25.0
III-4	A		0.92	45°	상부	23.0
III-5	A		0.90	45°	상부	17.3
III-6	A		0.90	30°	상부	19.2
III-7	A		0.92	30°	상부	19.3
종합	"	"	0.9	동위상	-	25.0

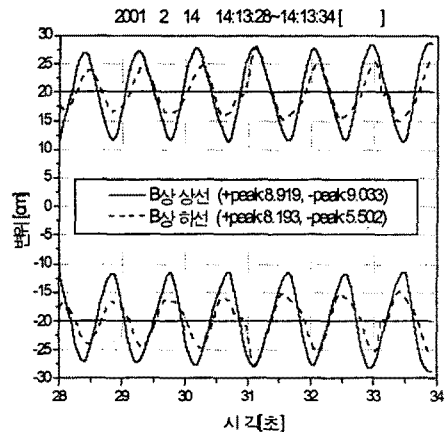


그림 2. 진동분석 파형의 예(I-1)

Fig. 2. Oscillation curve of analyzed interval I-1

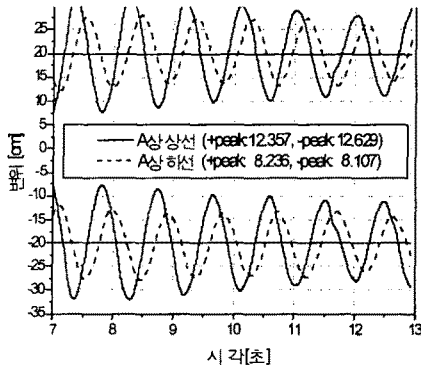


그림 3. 진동분석 파형의 예(III-3)  
Fig. 3. Oscillation curve of analyzed interval III-3

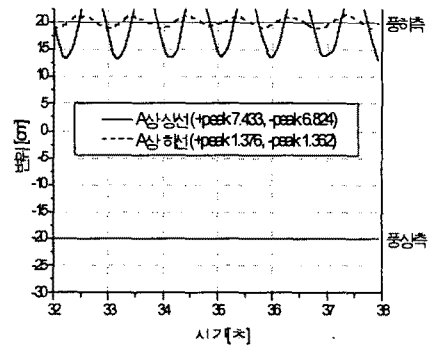


그림 4. 진동분석 파형의 예(IV-2)  
Fig. 4. Oscillation curve of analyzed interval IV-2

### 3.2.2 선로 C에 대한 진동현상 분석

선로 C는 진동이 매우 잘 발생되는 조건을 갖춘 선로로서 2번의 진동현상을 촬영하였다. 이하 관측된 진동현상을 각각 사례(IV), (V)로 구분하여 분석하였다. 이 선로의 특징은 비교적 낮은 풍속에서도 진동이 발생하였으며, 사례(V)의 경우 진동주기가 관측된 사례와 다르게 나타나는 특징이 있었다. 선로 C에 대한 진동의 종류 및 진동이 발생된 상, 진폭은 표4와 같으며, 진동형태 및 진동주기, 상하수도체간의 진동위상차, 최대진폭 발생위치 등은 표5와 같다. 또한 분석된 진동의 파형은 그림 4 및 그림 5와 같다.

표 2. 분석시간별 진동진폭(선로 C)  
Table 2. Oscillation amplitude of analyzed intervals

구분	진동종류	상 별	진동진폭 (Peak치) [cm]				진폭 [cm]
			상선		하선		
			+peak	-peak	+peak	-peak	
IV-1	서브스판	A	3.083	3.126	0.558	0.513	6.209
IV-2	"	A	7.433	6.824	1.376	1.362	14.257
IV-3	"	A	3.261	3.081	1.009	1.004	6.342
IV-4	"	A	6.445	6.814	1.640	1.450	13.259
V-1	"	B	5.010	5.298	5.423	4.882	10.308
V-2	"	B	3.770	4.012	2.638	2.511	7.782
V-3	"	A	5.280	5.346	3.310	3.022	10.626
V-4	"	B	4.312	5.343	5.505	4.462	10.067
V-5	"	C	3.144	2.440	4.700	4.560	9.260
최대진폭 [cm]			7.433	6.824	5.505	4.882	14.257

표 5. 진동현상 분석결과 (선로 C)  
Table 5. Analyzed results of some oscillation

구간	상 별	진동형태	주기 (초)	위상차	최대진폭(p-p)	
					발생위치	진폭(cm)
IV-1	A	서브스판*	0.92	0°	상부	6.3
IV-2	A	서브스판*	0.96	90°	상부	14.3
IV-3	A	서브스판	0.96	180°	상부	6.4
IV-4	A	서브스판*	0.96	90°	상부	13.3
V-1	B	서브스판	0.72	180°	상부	10.3
V-2	B	"	0.71	180°	상부	7.8
V-3	A	"	0.72	180°	상부	10.7
V-4	B	"	0.73	150°	하부	10.1
V-5	C	"	0.71	120°	하부	9.3

(주) \* 표시는 풍하측 상부수도체만 진동

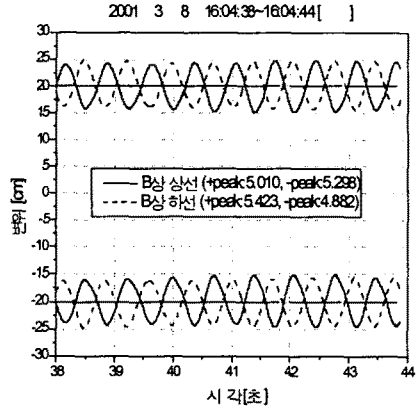


그림 5. 진동분석 파형의 예(V-1)  
Fig. 5. Oscillation curve of analyzed interval V-1

## 4. 결과분석 및 결론

345kV 4도체 송전선로에 대한 진동현상을 약 1년 간 관측한 결과분석을 요약 정리하면 다음과 같다.

- ① 후류에 의한 진동의 형태는 주로 서브스판진동이 나타나는 것으로 추정되고, 관측기간 중 강체진동은 관측되지 않았다.
- ② 진동주기는 주로 0.9초 정도이고, 0.7초 정도로 분석된 사례는 소경간이 작기 때문에 나타난 현상으로 분석된다.
- ③ 상부수도체와 하부수도체의 진동위상차는 대체적으로 동위상으로 진동하지만 180°의 위상차를 갖는 진동도 다수 관측되었다.
- ④ 지금까지 관측된 결과에 의하면 최대진폭은 25cm (p-p)로 분석되었다.
- ⑤ 선로에 따라 서브스판진동이 발생하는 풍속범위가 다르게 나타난다.

본 연구는 처음으로 송전선로의 진동현상을 직접 관측하여 분석한데 의미를 두고자 하며, 앞으로도 계속 현장 관측 및 분석을 통해 보다 일반화된 분석자료를 제시하여 향후 송전선로 유지보수 및 설계에 도움이 되고자 한다.

### 참고문헌

1. EPRI, Transmission Line Reference Book