

154kV 송전선로 겔로핑 현상 소개 및 대책 방안

이정한, 윤상호

한국전력공사 서울전력관리처 의정부전력소

An Actual Case of Installing Interphase spacers to Prevent Galloping

Lee Cheong-han, Yoon Sang-ho

Uijeongbu District Office Seoul Power Transmission District Center KEPCO

Abstract - 가공 송전선로의 경과지는 대부분 낮은 산악지로서 때때로 국지적인 기상현상에 노출되어 있다. 이러한 현상으로 매년 11월부터 익년3월 사이에 국지성 돌풍에 의한 겔로핑(Galloping)현상이 발생한다. 이 현상이 우리 전력소의 154kV 급포T/L(급오S/S-포천S/S)에서 발생하였다.

겔로핑 현상은 바람으로 인하여 전력선이 횡진과 출렁임이 발생하는 것을 말하며, 전력선이 심한 진동을 일으켜 전력선 상간 또는 전력선과 가공지선간의 혼촉으로 고장전류가 생기고, 고장전류에 의한 보호계전기 동작으로 선로가 Trip되며, 이로 인하여 전력공급이 중단된다. 또한 전력선의 기계적인 진동에 의하여 전력선의 단선으로 영구고장을 일으킬 수 있다.

본 논문에서는 경기북부지역의 산악지에 설치된 154kV 송전선로에서 산비탈면을 타고 오르는 상승 바람에 의한 겔로핑 사례를 국내 최초로 현장에서 촬영한 동영상 자료를 토대로 소개하고, 겔로핑 발생시 송전선로에 미친 영향 등 검토 결과를 알아본다. 그리고 전력선 상하간 혼촉이 발생한 지점의 아크 흔적을 설명하고, 겔로핑으로 인한 상간 상간 혼촉방지를 목적으로 개발된 폴리머 상간 스페이스의 시공 사례를 소개하며, 현재까지 상간 스페이스(interphase spacer)가 설치된 송전선로의 점검 결과를 소개하고자 한다.

1. 서 론

겔로핑(Galloping) 현상은 전선이 주로 착빙설에 의한 공기역학적 불안정성과 강풍에 의한 자(自)진동이라고 알려져 있다. 즉 전력선에 착빙설이 다양한 모양으로 형성되어, 전선단면의 비대칭성에 의해 피빙이 날개와 같이 작용하여 수평풍에 의한 인양력과 전선자중의 상호작용으로 전력선이 계속 저주파로 진동을 하는 현상으로 정의 하였다. 본 논문에서는 경기북부지역에서 발생한 이상 기상 현상과 지형적인 특성에 의한 송전선로 겔로핑 현상 및 겔로핑 방지 대책으로 폴리머 상간스페이스(interphase spacer)를 설치한 사례에 대하여 기술하였다.

겔로핑이 발생한 경기북부지역 154kV 송전선로의 경우 2004년과 2005년도에 동절기인 11월-3월 사이에 국지성 돌풍에 의한 겔로핑이 발생되었다. 겔로핑 발생 송전선로는 2001년도에 건설되었으며, 경과지(route)의 대부분이 산악지이다. 최근 건설되는 가공 송전선로의 경과지는 인근 지가의 하락과 전자파의 유해성 논란으로 불가피하게 인근 지역주민의 민원을 방지하기 위해 가급적 주거지역을 우회하거나, 토지 활용도가 낮은 산악지를 이용하여 선로를 건설하는 추세이다. 이와 같이 경과지의 제한성으로 인해 국지적인 이상 기상현상이 발생하는 산악지역으로 송전선로가 건설될 가능성이 높아지고 있다.

본 논문에서는 산비탈면을 타고 오르는 빠른 상승바람에 의해 154kV 송전선로 전력선이 겔로핑을 일으켜 수직 배열된 동일 회선 내의 상간 근접 또는 혼촉으로 아크 통전이 발생된 실제 고장 사례를 주제로 하였다. 송전선로 겔로핑이 발생되면, 상간 단락 또는 단-지락으로 고장전류에 의한 보호계전기가 동작되어 송전선로가 Trip되고, 전력공급 중단으로 이어졌다. 겔로핑이 심하게 장기 간동안 발생될 경우에는 기계적인 진동과 충격에 의한 전력선의 단선 또는 지지물의 파손으로 송전선로의 영구고장을 일으킬 수도 있다.

본 논문에서 경기북부지역의 산악지에 설치된 154kV 송전선로 겔로핑 현상을 국내최초 현장 촬영한 동영상 자료를 토대로 소개하고, 겔로핑이 발생된 원인에 대한분석과 송전설비에 미친 영향을 순서대로 분석 내용을 정리하였다. 겔로핑 발생시의 기상관측 데이터와 상관성을 기술하고, 전력선에 생긴 아크 흔적을 토대로 전력선간의 단락이 발생했던 지점을 실제로 관측할 수 있었다. 겔로핑으로 인한 상간 단락 방지를 목적으로 개발된 폴리머 상간스페이스의 시공 사례를 소개하고, 현재까지 상간스페이스가 설치된 송전선로의 점검 결과를 소개하고자 한다.

2. 송전선로 겔로핑 현상 분석 및 대책

가공 송전선로는 폭풍우, 지진, 강우, 눈, 뇌 등 자연의 장해에 대해서 언제나 안전하게 안정적으로 전력을 송전할 수 있도록 설계 시공된다. 송전선로는 건설비용의 경제성과 계통의 안전성을 고려하여 수직배열로 2회선용 표준철타를 사용한다. 전력선의 경우에는 ACSR 410㎜ 복도체가 주로 사용된다. 수직배열은 전력선을 지지물에 수직으로 배치하는 방식으로 장점으로 선하지가 줄어서 용지 확보에 유리하고 다회선(3회선 이상) 선로 구성과 병가, 분기 개소에 적용이 편리하다. 철타 높이가 높아진다는 점과 동절기에 피빙 탈락으로 발생하는 전력선 도약(sleet jump)시에 혼촉의 우려가 단점이다. 이러한 이유로 표준철타에서는 전선의 오프 셋(off set)을 취하여 주도록 되어 있다.

송전선로는 가혹한 기상현상에도 지지물이 도파가 일어나지 않도록 기준 속도압, 최대풍속, 돌풍을 고려하여 설계가 된다. 전선의 배치는 전선이 정지상태에서 표준절연간격을 유지하고 바람에 의한 횡진시 상간, 상-대지간의 전력선이 근접하는 조건에서 이상시 절연간격 이상을 유지하도록 설계기준을 정하였다. 경과지 선정 기준에 이상풍압 및 돌풍발생 개소는 반드시 피하도록 되어 있으므로 전력선 배열시 겔로핑을 고려하여 전력선간의 간격을 설계기준으로 별도로 정하지는 않았다. 최근 송전선로 경과지가 주로 산지를 경과함에 따라 설계기준에 이외의 국지적인 지역적 특성 기상에 노출될 가능성이 높아졌다고 볼 수 있다. 일반적으로 겔로핑 현상은 자주 일어나는 현상이 아니고, 매우 드물게 일어나는 현상으로 경과지 선정시 기상자료를 분석하여 겔로핑 가능성을 예측하기는 기술적으로 어렵다.

2.1 154kV 송전선로 상간공기절연간격의 기준

직접접지방식인 154kV 송전선로는 계통에서 발생하는 내부이상 전압에 대하여 섬락이 일어나지 않도록 설계를 하며, 절연설계시 내부이상전압으로는 상용주파단시간과전압, 개폐과전압을 적용한다. 외부이상전압에 대하여는 송전선로에 침입하는 뇌과전압으로 직격뇌, 역섬락을 다음과 같이 고려한다.

$$\text{절연설계 목표 내전압}(V_w) = V_B \times n \times k_1 \quad (1)$$

$$V_B : 1p.u \text{ 당 기준전압}(kV) = \frac{170}{\sqrt{3}}$$

n : 과전압 배수

- 상용주파단시간과전압 상-대지간 : 1.35,

- 개폐과전압 상-대지간 : 3.3, 상간 : 4.6

k1 : 기상보정계수

- 개폐과전압 : 1.082

- 상용주파단시간과전압 : 1.165

$$\text{임계섬락전압}(V_{50\%}) = \frac{V_w}{1 - m \cdot \sigma_s} \quad (2)$$

m : 적용배수(적용값 : 3)

σs : 절연장도 확률분포의 표준편차(상용주파: 3, 개폐시: 5)

상용주파 단시간과전압에 대한 50% 섬락전압의 계산은 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$CFO = V_{50\%} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_m \times n \times k_1 \times k_2 \quad (3)$$

Vm : 계통최고전압의 실효치 [kV]

n : 과전압배수 [p.u]

k2 : 내전압계수

한전 설계기준은 154kV의 상-대지간의 경우 Vm=170, n=1.35,

k1=1.165, k2=1.099를 대입하면 V50%는 240kV가 된다. 이때의 공기절연거리를 실증시험에 의한 식(4)에서 d에 대해 풀면 식 (5)와 같다.

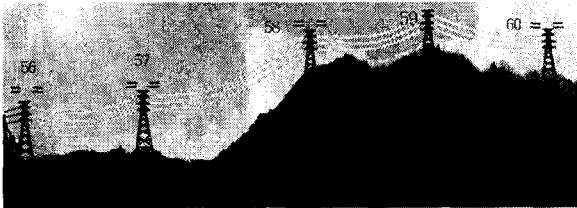
$$V50\% = 1.26 \cdot 1,080 \cdot \ln(0.46 \cdot d + 1) \quad (4)$$

$$d = \frac{1}{0.57} \times (e^{\frac{CFO}{k \cdot 950}} - 1) \quad (5)$$

식(5)에 240kV를 대입하면 d는 420mm가 되며, 실제 적용값은 450mm로 하였다. 같은 방법으로 상간 공기절연간격을 산출하면 n=4.6으로 적용하여 식(4)와 식(5)를 계산하여 상간 공기절연간격이 1,500mm를 산출할 수 있다. 따라서 이상시 154kV 송전선로에서 도체-대지(가공지선)간에 공기절연이 파괴되어 아크(Arc)동전이 되지 않기 위해서는 450mm의 이격거리를 유지하여야 하며, 도체-도체간의 이격거리는 1,500mm를 유지하여야 한다. 갠로핑 발생시 송전선로가 트립되는 원인은 전력선 근접시 아크동전에 의한 고장 전류의 발생이다.

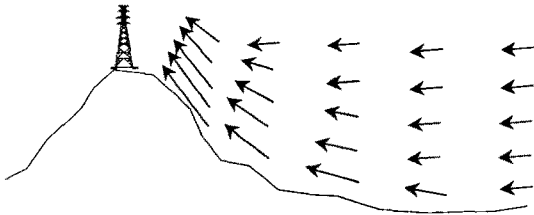
2.2 갠로핑 발생 송전선로 경과지 특성

일반적으로 갠로핑은 송전선로 경과지가 대부분이 해안선, 계곡, 능선 등을 이상 풍압이 발생하는 경우이다. 경기북부지역의 갠로핑이 발생된 구간의 송전선로는 그림 1과 같이 산봉우리를 연결하는 능선을 따라 설치가 되었다.

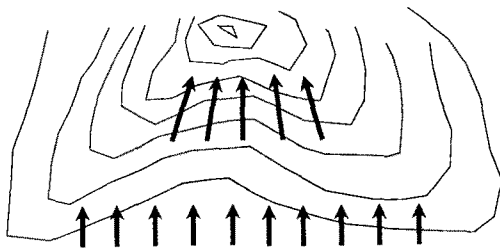


<그림 1> 갠로핑 발생 송전선로 사진

송전철탑 57호-58호와 59호-60호 구간은 공통적으로 그림 2와 같이 바람이 산비탈면을 타고 올라와서 정상부근에서 전력선 하단에서 수직방향으로 강하게 상승하는 현상이 발생되기 쉬운 지형적인 특성과 그림 3과 같이 계곡이 발달되어 바람을 능선사이로 가두면서 골짜기를 따라 위로 오르면서 골짜기가 좁아져서 바람이 합쳐지기 쉬운 지형이었다.



<그림 2> 산비탈면을 타고 오르는 바람 특성



<그림 3> 골짜기에서 바람이 모아지는 현상

갠로핑이 발생된 송전선로 구간은 산의 봉우리 정상부근에 위치하여 있다. 그림과 같이 바람의 속도가 변화하는 현상을 설명할 수 있다. 즉 단면적이 변화하는 산계곡과 비탈면을 흐르는 공기는 단면적이 좁아지는 산봉우리 쪽에서 공기가 더 가까이 모이게 된다. 이는 공기의 속도(울직임)가 빠르다는 것을 의미한다. 빨라진 공기는 전력선의 하단과 충돌하여 전력선을 위로 밀어 올리는 작용을 하여 불규칙한 진동을 일으키며, 이로 인해 갠로핑을 발생시킨다.

2.3 송전선로 갠로핑 발생 상황

송전선로 보호방식은 주 보호(main protection)는 고장시 나타나는 2개 이상의 전류차에 의해 고장을 검출하는 비율차동계전방식

(87, differential relaying)을 적용하고, 후비보호(back up protection)는 계전기 설치점에서 본 임피던스로서 고장 여부를 판별하는 거리계전방식(21, distance relaying)을 적용하고 있다. 표 2는 송전단 변전소의 송전선로 보호계전기의 동작상황을 중심으로 갠로핑 발생 상황을 요약한 것이다.

일시	시간	선로	보호계전기 동작일부	기상	비고
2004 11/26	10:07	#2T/L	87 A B 21 A B Z1	눈보라	송전선로 상배열 (상중하) #1T/L (B A C) #2T/L (C B A)
	10:16	#2T/L	87 A B N 21 A B N Z1		
	10:51	#1T/L	87 A B 21 A B N Z1		
	13:45	#1T/L	87 A B 21 A B N Z1		
	13:58	#2T/L	87 A B 21 A B Z1		
	14:00	#2T/L	상 동		
	14:45	#2T/L	상 동		
	14:47	#2T/L	상 동		
	15:00	#2T/L	상 동		
2005 02/15	20:33	#1T/L	87 A C 21 A C Z1	진눈깨비	
	20:42	#1T/L	상 동		
	20:48	#1T/L	상 동		
2005 03/11	16:38	#2T/L	87 A B 21 A B Z1	흐림	
	16:47	#2T/L	상 동		

<표 1> 갠로핑 발생 상황

2004년 11월 24일에 #1T/L의 경우 87계전기는 A상(하단)과 B상(중단) 도체 간에 혼측으로 단락이 발생되었고, 동시에 21계전기의 동작기기도 A, B상 간의 단락이 Zone 1에서 발생되었음을 나타내고 있다. 송전선로 임피던스를 통해서 거리를 표정한 결과 19.5km로 고장지점이 철탑 56호에서 60호 사이 지점으로 파악할 수 있었다. 일반적인 송전선로의 외통접촉으로 인한 고장과는 다른 보호계전기 동작기사가 발생되었다. 송전선로 트립으로 인하여 고장선로를 일시하여 송전선로 상태를 점검하는 과정에서 갠로핑을 확인할 수 있었다. 갠로핑을 최초 목격했을 때 바람의 세기는 센바람(13.9~17.1 m/scc, 나무전체가 흔들리고, 걸기가 어려운 정도의 바람세기)으로 관측되었다. 바람은 산봉우리 능선을 따라 남-북 방향으로 설치된 송전선로의 좌측(서쪽)과 우측(동쪽)에서 전력선을 향해 수직방향으로 불규칙적으로 불었다. 전력선이 수직과 수평으로 불규칙적인 진동으로 상간 간격이 매우 가깝게 근접되었을 때 아크가 발생되었다. 표 2에 기재된 단·지락(ABN) 동적기사는 상간 단락으로 발생된 고장전류가 철탑으로 삼파되면서 검출된 현상으로 분석된다.

2005년도 갠로핑 발생 당시 기상 데이터를 분석해 보면, 세가지 공통점이 있다. 첫째는 기온이 급격히 하강하는 시점에 발생한다는 점이다. 둘째는 풍속이 점차 빨라지는 시점이 발생한다는 점과 셋째로 풍향이 산비탈과 골짜기가 형성된 동쪽 또는 서쪽으로 바람이 불었을 경우 갠로핑이 발생되었던 점이다.

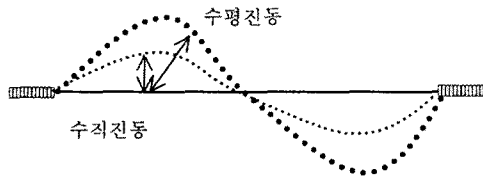
일자	시간	기온	풍향	풍속	비고	
2005. 02.15	19:00	4.6	82	E	3.3	
	20:00	4.1	92	E	3.5	#1T/L 갠로핑
	21:00	3.8	66	ENE	4.0	
2005. 03.11	15:00	1.2	274	WNW	2.4	
	16:00	1.9	267	W	4.4	#2T/L 갠로핑
	17:00	0.7	286	W	3.6	

<표 2> 갠로핑 당시 기상데이터(가산면 관측소)

#1T/L은 동쪽의 계곡과 산비탈에 영향이 크고, #2T/L은 서쪽의 계곡과 산비탈에 영향을 많이 받았을 것으로 관측되었다. 기온의 하강과 풍속의 증가는 송전선로가 설치된 산봉우리에서 강풍이 발생하는 기상조건으로 추정된다.

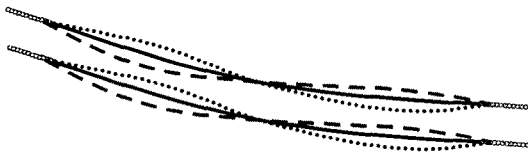
2.4 갠로핑으로 인한 전력선 진동 분석

송전선로 갠로핑으로 인하여 상도체간의 단·지락이 발생시 전력선의 진동을 살펴보면, 그림 4와 같이 수직 진동과 수평진동의 두 가지 형태가 혼합되어 발생된다.



〈그림 4〉 갠로핑의 진동 형태

송전철탄의 경우 도체간의 수직거리의 최소가 3.8m이고, 수평거리의 6.4m이다. 따라서 수평간의 혼속으로 인한 회선 단락보다 수직진동으로 인한 상간 단락이 일어나기 쉽다. 실제로 경기북부 154kV 송전선로의 경우에도 15회 모두 수직진동에 의한 상단-중단 또는 중단-하단의 상간단락이 발생되었다. 송전선로 갠로핑 현상을 관측한 결과 그림 5의 형태와 유사한 진동으로 인한 상간 단락을 일으켰다. 이는 현재까지 갠로핑이 전선에 착빙설에 의한 공기역학적 불안전성과 강풍에 의한 자여진동 또는 착설, 고드름, 착빙의 원인으로 알려져 있었다. 그러나 경기북부에서 발생한 154kV 송전선로의 갠로핑 현상은 이와 달리 산비탈면을 타고 오르는 강풍에 의해 일어난 것이 특이한 점이다.

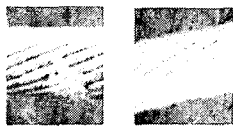


〈그림 5〉 갠로핑에 의한 상간 단락 사례

갠로핑으로 인한 상간 단락시 아크가 발생되었다. 아크 통전으로 인한 보호계전기의 동작이 이루어졌다면, 전력선에 아크 흔적이 일어나는 지점이 강풍에 의한 갠로핑 발생시 전력선들이 진동으로 가장 가깝게 근접해서 단락이 발생되는 취약한 지점으로 볼 수 있다.

2.5 전력선 아크 흔적에 의한 갠로핑 특성 분석

갠로핑이 발생한 선로를 점검한 결과, 철탄암의 휨과 부재의 변형은 발생되지 않았고, 애자금류의 파손도 발견되지 않았다. 복도체의 간격을 일정하게 유지시켜 주는 스페이스의 볼트 풀림과 파지면의 마찰에 의한 전력선 소선 단선 역시 발견되지 않았다. 갠로핑이 발생한 송전선로 전력선 표면을 점검한 결과, 전력선 도체에 아크 흔적을 발견할 수 있었다.

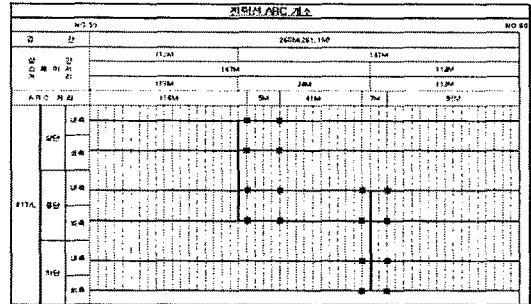
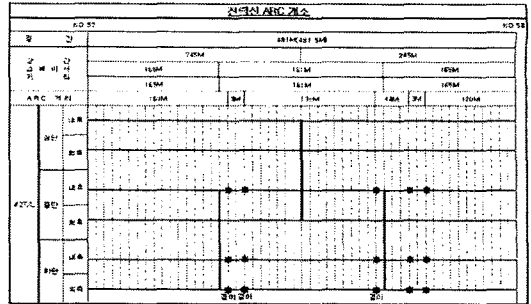


〈그림 6〉 아크 흔적

구간	경간(m)	이도(m)	고저차	아크흔적
57-58	481	15.90	+97.99	15개
59-60	260	4.66	-24.05	16개

〈표 3〉 아크 발생 경간과 이도

도체에 발생된 아크 흔적이 그룹으로 이루고 있었다. 그림 6은 전력선에 나타난 아크흔적과 이로 인해 코로나 발생 예방을 위해 표면처리 작업 후의 사진이다. 아크흔적은 철탄 57호와 58호간 481m 경간과 59호와 60호사이의 260m 경간 두 곳에서 발생되었다. 두 구간의 전력선 설치 상태인 이도를 실측한 결과 설계치와 차이가 없었다. 두 구간의 아크 발생 위치를 그림 7과 같다. 그림과 같이 아크가 발생된 지점은 중단-하단, 또는 상단-중단에 쌍으로 나타났다.



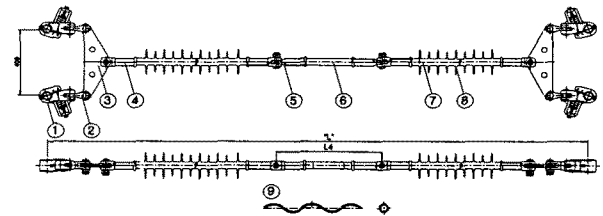
〈그림 7〉 전력선 아크 발생 위치

아크가 발생된 지점에 전력선이 상간 근접이 되지 않도록 강제적으로 일정한 거리를 유지시키는 장치를 설치한다면, 갠로핑 발생시에도 상간 단락으로 인한 송전선로의 트립을 방지할 수 있을 것이다.

2.6 상간스페이서를 이용한 갠로핑 고장 예방

갠로핑으로 인한 송전선로의 고장을 방지하기 위해서는 국지성 강풍이 강한 산계곡이 발달한 산봉우리를 피하여 경과지(route)를 선정하는 것이 필요하다. 만일 갠로핑이 발생된다면 철탄을 이설하거나 전력선간 이격거리를 넓힌 특수형 철탄을 사용하는 방법도 효과적일 수 있다. 그러나 이와 같은 방법은 경제적으로 많은 비용을 수반하며, 공사기간도 장기간이 소요되어 대체선로가 없는 경우에 휴전 등의 제약을 받게 된다.

갠로핑이 발생한 경기북부지역의 154kV 송전선로는 해당구역을 우회할 대체 경과지가 마땅하지 않았다. 이와 유사한 갠로핑 현상이 본 선로 이외에도 전국적으로 다발하여 폴리머 애자를 이용한 풀리머 상간스페이서의 개발이 추진되었고, 그림 8은 2005년도에 154kV 송전선로에 적용된 ACSR 410mm 상간스페이서의 도면이다. 상간스페이서는 송전선로의 경간에 따라 표 5와 같이 설치한다.



〈그림 8〉 폴리머 상간스페이서

경기북부 154kV 송전선로는 풍암지역이 Ⅱ지역에 해당되며, 풀리머 상간스페이서(그림 7에서 1로 표시)는 표 5의 기준과 같이 57-58호 구간에 3개, 59호-60호 구간이 2개를 설치하였다. 그림 7과 같이 상간스페이서 설치점과 단락으로 인해서 아크가 발생된 지점은 매우 근접하게 일치되었다. 따라서 향후 국지성 강풍으로 인한 송전선로 갠로핑 발생이 가능한 기상에도 상간스페이서가 도체간의 간격을 일정하게 유지시켜 아크 통전으로 인한 단락 고장을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

지역		다설지역	
경 간	수량	경 간	수량
200 400m	2	160 320m	2
600m	3	480m	3
800m	5	640m	5
1000m	7	800m	7
1200m	9	960m	9
1400m	11	1120m	11
1600m	13	1280m	13
		1440m	15
		1600m	17

〈표 4〉 상간스페이서 설치수량(ACSR 410⁷ 기준)

궤로핑 방지용 상간스페이서를 설치한 이후에 지속적으로 송전선로를 순시 점검하였다. 현재까지는 궤로핑으로 인한 트립이 발생되지 않았으며, 전력선의 손상이나 애자금구류의 파손은 발생되지 않았다.

4. 결 론

본 논문에서는 경기북부지역에 설치된 154kV 송전선로의 궤로핑 실제 사례를 소개하였다. 과거 전력선의 착빙과 착설에 의한 도약(sleet jump)에 의한 궤로핑의 원인과 달리 산비탈면을 타고 오르는 국지성 강풍에 의한 발생한 사례와 발생 당시 기상 상황을 소개하였다. 궤로핑 발생시 송전선로의 이상시 상간공기절연간격보다 이격거리가 좁아져서 아크 통전에 의한 송전선 트립과 이에 대한 보호계전기의 전체 동작기사를 소개하고, 상간 단락과 상간 단·지락이 발생된 현상을 소개하였다. 수직배열인 표준철탑은 궤로핑 발생시 전력선의 수직방향 진동에 취약하다는 점을 제시하였다. 궤로핑이 발생한 구간을 점검한 내용과 아크발생 지점을 통해 전력선에서 궤로핑에 취약한 지점을 확인할 수 있었으며, 궤로핑 방지 대책으로 폴리머 상간스페이서의 설치 실례를 소개하였다. 또한 상간스페이서의 설치 위치와 아크발생 지점이 대체로 일치하여 향후 유사 기상에 의한 궤로핑으로 기인된 송전선로 트립 및 순간정전 예방 효과가 예상된다라는 점을 알 수 있었다.

최근 송전선로 경과지가 주로 산지를 이용하면서, 국지적인 특이 현상에 의한 궤로핑이 점차 늘어나는 추세이다. 궤로핑 발생의 유형과 지형적인 공통점을 연구한다면, 풍향과 산비탈면, 계곡의 구조를 분석하여 계절적인 풍향과 풍속을 계측하여 궤로핑의 발생 가능성에 대한 예측이 가능해지리라 생각된다. 궤로핑은 판측하기가 쉽지 않으며, 발생빈도가 매우 적다. 따라서 국내 궤로핑 사례를 중심으로 한 논문은 매우 드물다. 본 논문은 궤로핑 발생 사례를 중심으로 이루어져서 궤로핑 현상의 이해와 이와 관련된 송전선로 건설과 운영업무에 유용하게 이용될 것이다. 끝으로 본 논문에서 미처 다루지 못한 궤로핑 진동 과형 분석, 궤로핑 가능성이 높은 지형 분석방법 등은 차기 논문에서 다루도록 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "설계기준", 한국전력공사 경영정보처
- [2] 송영길, "송배전공학", 동일출판사, 1993
- [3] 한국전력공사 송변전사업단, "송변전 기술용어해설집", 한국전력공사, 2001
- [4] 이동일 외 8인, "345kV 4도체 가공선로 진동대책 연구최종 보고서", 한국전력공사 전력연구원, 2003
- [5] 東京電力株式會社, "架空送電設計の手引", 東京電力株式會社, 平成 5年
- [6] 대학물리학교재편찬위원회, "대학물리학", 도서출판 북스힐, 2002