

송전선로 풍소음 발생 원인분석 및 저감대책

심순보\* 민병욱\* 김세현\* 이동일\*\* 신구용\*\*  
 \*한국전력공사 송변전건설처 \*\*한국전력공사 전력연구원

Analysis and Mitigative Countermeasures of Wind Noise from Transmission Line

Soon-Bo.Sim\* Byeong-Wook.Min\* Sae-Hyun.Kim\* Dong-il.Lee\*\* Gu-yong,Shin\*\*  
 \*KEPCO \*\*KEPRI

**Abstract** - Most of the inhabitants living near power line complain wind noise from power line to be problems they can feel directly if there is no countermeasure to remove noise basically.

Wind noise from power line happens by tower, insulators, conductor and others in their operating individually or complexly. Wind noise show us several forms like whistle, siren and bullfrog croaking as height of noise source is high and elastic wave tone with low frequency.

This paper shows actual conditions and occurrence cause which may be investigated and analyzed on the wind noise, and also prepares mitigation methods and introduces a working sample to reduce a wind noise.

1. 서 론

국민의 삶의 질 향상과 더불어 환경에 대한 인식이 높아지고 있으며 또한 송전선로에 의한 풍소음, 전자파, 전파장애, 라디오 및 TV 잡음장애 등 전기환경장해에 대한 관심도 높아지고 있어 이에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있고 송전선로도 환경친화형 설비로 건설되고 있다.

그러나 최근에 건설되는 송전선로는 다회선·다도체화 및 초고압화로 송전설비의 구조가 다양·대형화됨에 따라 풍소음이 복잡한 형태로 발생되고 있어 송전선로 인근 주민이 직접 피부로 느끼는 생활환경 문제로 대두되고 있으며, 송전설비에서 발생하고 있는 풍소음은 근본적으로 소음원 제거 대책없는 해결이 어려운 생활환경 민원의 성격이 강한 전기환경장해이다.

송전선로에서 발생하는 풍소음은 첩탑, 애자, 전선, 설비부착물 등에서 단독 또는 복합적으로 작용하여 발생되며, 다수의 소음원에서 동시에 발생될 경우에는 절대 풍소음이 증가하고 장시간 동안 연속적으로 발생할 뿐만 아니라 음원의 높이가 높고 탄성파음으로 휘파람, 피리, 싸이렌, 황소개구리 울음소리 등 가청 감도가 좋지 않은 다양한 형태로 나타나고 있다.

따라서, 본 논문에서는 우리 나라 송전선로의 풍소음 발생실태와 발생원인을 조사·분석하고 소음원에 대한 풍동시험 및 실증시험 결과에 따른 풍소음 저감방안과 그 적용사례를 제시하였다.

2. 송전선로 풍소음 발생원인 조사·분석

2.1 전선의 풍소음

우리 나라의 송전선 풍소음 발생 사례는 765 kV 당진 화력 송전선로 등 7개 선로에 13개소로 조사되었으며, 해안 및 야산의 계곡을 지나가는 송전선에 바람이 거의 직각으로 부딪치는 곳에서는 비교적 많이 발생하고 계절별로는 동계의 강풍시에 많이 발생하고 있으며 설비형태면에서는 대형·다도체 송전선에서 많이 발생하고 있다.

특히 765kV 송전선로는 첩탑의 탐정높이가 평균 95m 로 높고 6도체로 구성되어 있어 상공체계수의 증가로

전선에 작용하는 풍압력이 클 뿐 만 아니라 다도체 송전선로의 특징인 바람이 불어오는 쪽에 있는 전방 소도체(windward conductor)에 의해 바람이 불어가는 쪽에 있는 후방 소도체(leeward conductor)의 풍음 상승특성으로 풍소음이 많이 발생되고 있다.

전선에서 발생하는 풍소음은 전선의 재질과 진동특성과는 관계가 없고 외면형상에 의해 좌우되며, 전선의 표면상태(거칠기)와 바람의 형태에 따라 변화하게 된다. 전선의 표면이 원활하거나 층류(random하지 않은 흐름)가 있는 경우 풍음레벨은 높아지게 된다.

고체가 유체 중에서 진동하게 되면 주위의 유체에 압력변동이 발생하게 되어 그것이 음파로 변해 전달된다. 그러나 고체가 진동하지 않아도 소리가 발생하는 경우가 있다. 즉 음파를 전달하는 매질 자체의 운동에 의한 경우로서 압력소음이라 하며 전선에서 발생하는 풍소음도 압력소음이라 할 수 있다. 전선의 풍소음은 전선표면의 바람의 박리에 의한 압력변동이고, 박리의 위상은 무질서해지기 때문에 소리로 변하게 되는 경우가 많다.

박리에 의해 후류에 형성되는 소용돌이가 규칙적인 경우에는 칼만 와류(Karman Vortex)가 되고, 이것이 미풍 진동현상을 일으키지만 풍소음은 전혀 다른 현상이다. 전선에 직각으로 부딪치는 바람의 경우에는 바람이 전선 표면의 일정 부분에서 점성의 영향에 의한 경계층이 발생하고, 그 중에서 속도분포와 압력구배의 관계로부터 결정되는 위치에서 경계층의 속도분포가 역류하는 박리현상을 발생시킨다.

예를 들면 유체 중에 구와 원주 등을 놓았을 때, 표면의 압력분포를 보면, 전면에서 후면으로 이동함에 따라 압력은 저하되며 어떤 점에서 최소가 되고 그 이후에는 압력이 역으로 상승하는 것으로 알려져 있다. 이 압력상승에 의해 물체표면에 따라 흐르는 유체의 점성 때문에 흐름이 방해받을 뿐만 아니라 압력상승을 넘어야 하기 때문에 어떤 부분에서 흐름이 뒤틀려버리게 되어, 물체 표면으로부터 박리가 일어나게 된다.

이 박리에 의해 압력의 변동이 발생하게 됨으로써 이것이 풍소음으로 들려오게 된다. 전선표면의 압력분포와 박리현상을 그림1과 같이 모식도로 나타내었다.[1][2]

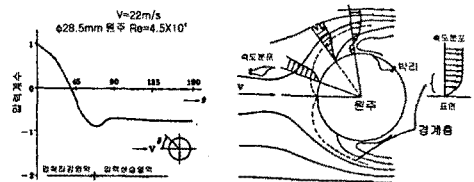


그림 1 전선표면의 압력분포 및 박리현상  
 Fig. 1 Pressure distribution and exfoliation phenomenon of conductor surface

2.2 첩탑의 풍소음

우리 나라의 송전용 첩탑은 대부분 산형강으로 건설되

있으며 최근에 설치된 765kV용 철타과 345kV용 일부 철타에 강관을 사용하였다. 그 동안 산형강 철타에서는 풍소음에 대한 환경장해는 제기되지 않았지만 765kV용 일부 강관철타에서 풍소음이 발생하였다.

송전용 대형 철타에는 추락방지장치, 승강기레일, 휴게소 등 각종 부속물이 복잡하게 설치되어 있어 풍소음을 발생시키는 메카니즘이 복잡할 뿐 아니라 강관철타 부재는 산형강보다 직경이 커서 강관부재 후방에서 발생하는 칼만와류(Karman Vortex)로 인하여 풍소음이 발생되고 있다.

철타의 풍소음 발생 탁월주파수는 식1과 같이 철타부재의 직경에 반비례하므로 765kV 철타과 같이 직경이 큰 부재에서 발생하는 풍소음은 같은 풍속에서 직경이 작은 전선에 비하여 저주파수의 풍소음이 발생하게 된다.

$$f = S \cdot \frac{U}{d} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

여기서,  $f$ : 풍소음 탁월 주파수[Hz]  
 $S$ : Strouhal 수  
 $U$ : 풍속 [m/s]  
 $d$ : 철타부재 직경 [m]

따라서 철타에서 발생하는 저주파수의 풍소음은 감쇄 특성이 적어 멀리까지 전파되나, 거리가 멀어질수록 선소음원 특성인 전선의 풍소음 보다 점소음원 특성인 철타의 풍소음은 저감특성이 양호하게 나타나고 있다.[3]

또한 철타의 풍소음은 칼만 와류 뿐 만 아니라 강관의 단말부에 바람이 통과할 때 강관이 피리와 같은 역할로 인하여 풍소음이 발생하게 된다.

### 2.3 애자의 풍소음

765kV 당진화력 송전선로의 경우 풍속이 약 10% 이상에서 애자런 부근으로부터 단속적인 휘파람 소리와 싸이렌 소리의 중간 성격의 소음이 관찰되었다. 그러나 이러한 애자의 풍소음은 풍속이 25% 이상으로 매우 높아지면 발생하지 않는다는 일본의 시험보고도 있으며, 실제 국내 풍동시험에서도 높은 풍속에서는 애자의 소음원인 피크 소음치가 나타나지 않았다.

애자의 풍소음 발생 원인으로서는 애자의 연면거리 확보를 위하여 제작된 자기부 하단의 주름부분(요철부분)에 규칙적인 바람의 소용돌이가 발생하고 이것이 애자의 고유진동수와 일치하여 발생하는 것으로 추정이 되며, 애자런의 볼과 캡의 연결부분에 바람이 통과되면서 발생하기도 한다.[3]

### 2.4 항공장애표시구의 풍소음

송전선로에는 항공법 제83조의 규정에 의거 지표 또는 수면으로부터 60미터 이상의 가공지선에 항공장애표시구를 설치하고 있으며, 2002년 7월말 현재로 전국에 47,670개가 설치되어 있다.

항공장애표시구로 인한 풍소음 발생 사례는 765kV 신서산 송전선로 등 5개 선로에 9개소에서 발생되고 있는 것으로 조사되었으며, 386Hz를 기본주파수로 하는 공명음임을 확인하였다.

항공장애표시구에서 발생하는 풍소음은 발생이 시작되면 장시간 동안 지속되며 음원의 높이가 높을 뿐 만 아니라 다수의 점음원(표시구)에서 동시 발생되어 절대 풍소음이 증가하게 되고 다른 풍소음과는 달리 5%이하의 저풍속에서도 발생하고 있다.

항공장애표시구의 풍소음 발생원인으로는 빗물이 침투되었을 경우 배수를 위한 직경 8mm의 배수공(10개)에 통풍으로 인한 공명을 발생과 반구(hemisphere)의 요철(凹凸) flange의 이완에 따른 공명음, 그리고 클램프의 전선장착부분의 간격에 의하여 공명음이 발생되고 있다.[4]

### 3. 송전선로 풍소음 저감 대책 및 적용사례

#### 3.1 전선 풍소음 저감 대책

전선의 풍소음 저감 대책으로는 전선표면에서 바람 흐름의 박리를 지체시키는 저풍소음 전선을 사용하거나 전선 외층에 spiral rod를 감는 전선표면 돌기방식이 있다.

또한 기체의 흡입·배출작용을 방음재의 취부방식, 음파의 상호간섭을 저감하기 위한 소도체 간격 확대방식, 그리고 음원 에너지 감소를 위한 소도체수 감소방식 등이 있으나 금구류의 구조 변경이 필요하고 송전용량의 감소 등으로 실용성이 적다.[1][4]

풍소음이 심하게 발생된 765kV 당진화력 송전선로의 풍소음 저감을 위하여 spiral rod의 형상 설계를 위한 특성시험을 하였다. 대각2조, 밀착2조, 대각밀착4조 방식에 대하여 풍동시험설비를 이용한 풍소음 특성시험과 코로나케이지를 이용한 코로나 발생 특성시험 분석결과를 토대로 그림2와 같이 대각밀착4조 방식을 선정하고 1999년 12월부터 2000년 4월까지 그림3과 같이 고창실증시험선로에 설치하여 실증시험을 하였으며, 실증시험을 통하여 cardinal 전선용 spiral rod를 표1의 규격과 같이 개발하여 실용화하였다.

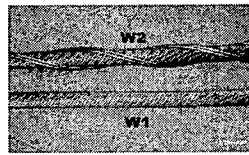


그림 2 대각밀착4조 spiral rod  
 Fig. 2 Execution of 4-spiral rod

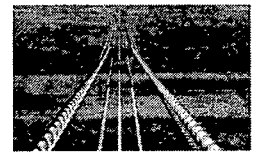


그림 3 Spiral rod 실증시험  
 Fig. 3 Spiral rod field test

표 1 Spiral rod의 개발규격

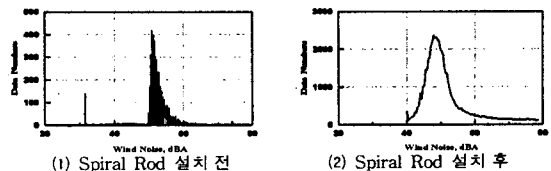
Table 1 Development Standards of Spiral Rod

전선종류	Pitch	직경	길이	꼬임방향
Cardinal	330mm	6.2mm	2.5m	S, Z
AW 200mm <sup>2</sup>	250mm	4.0mm	2.5m	S

765kV 당진화력 송전선의 풍소음 저감을 위하여 전력선 및 가공지선에 spiral rod를 감고 그림4와 같이 풍소음을 측정하였다. Spiral rod 설치 전후의 풍소음 통계치(L50%)는 풍속 2~2.8%에서 각각 52.1dBA, 49.3dBA로 약 3dBA가 감소되었다. 또한 spiral rod의 설치 전후에 발생한 풍소음의 분포는 50~60dBA에서 40~60dBA로 완화되었으며, 풍소음 발생 분포도는 그림5와 같다.



그림 4 당진화력T/L 풍소음 측정  
 Fig. 4 Wind noise measurement



(1) Spiral Rod 설치 전 (2) Spiral Rod 설치 후  
 그림 5 당진화력T/L spiral rod 설치 전후의 풍소음 분포도

Fig. 5 Wind noise distribution chart on the spiral rod effect

또한 향후 건설되는 765kV 송전선로의 풍소음 발생 예상지역에 적용할 수 있도록 와류 방지용 전선표면 돌

기형 저풍소음 전선과 가선장비 및 금구류를 개발하였고 저풍소음 전선(LN-Grackle 610mm)을 제작하여 실증시험 선로에 가선하고 실규모 전기환경시험을 완료하였다.

LN-Grackle 610mm 전선의 형상은 그림6과 같으며 풍소음 특성 시험 결과, 표2와 같이 cardinal에 비해 약 14% 감소하였다.

표 2 LN-Grackle 610mm의 풍소음 특성

Table 2 Wind noise Characteristics

풍속 (%)	풍소음 (dBA)		감소율
	Cardinal	LN-Grackle	
22.4	54.4	46.3	14.9%
26.0	66.1	55.1	16.6%
30.0	68.9	58.1	15.7%
38.0	75.6	68.0	10.1%
평균	66.25	56.87	14.2%

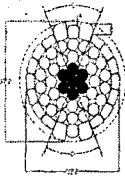


그림 6 저풍소음 전선 Fig. 6 LN-Grackle

### 3.2 철탑 풍소음 저감 대책

철탑의 풍소음 저감대책으로는 부재 후방에서 발생하는 칼만와류(Karman Vortex)의 발생을 방지하는 방안이 최우선이다. 철탑 풍소음 저감대책에 대한 구체적인 연구 사례는 없으나 일본의 경우에는 그림7과 같이 주주재(main post)를 제외한 철탑부재에 대형 Spiral rod를 감아서 풍소음 저감특성에 대하여 시험하고 있다.

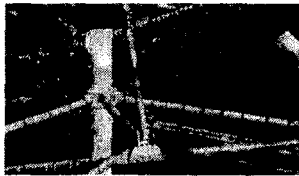


그림 7 철탑 풍소음 저감용 Spiral rod  
Fig. 7 Spiral rod for tower

765kV 당진화력 송전선로의 경우에는 강관철탑에서 발생하는 풍소음을 저감하기 위하여 그림8과 같이 강관부재 단말부의 구멍을 막음으로써 강관의 피리효과에 의한 풍소음이 발생되지 않도록 하였다.



(1) 강관부재 단말부 밀봉 전 (2) 강관부재 단말부 밀봉 후

그림 8 철탑 풍소음 저감을 위한 강관 단말의 밀봉  
Fig. 8 Seal up of pipe end

### 3.3 애자 풍소음을 저감 대책

애자의 풍소음 저감대책으로는 자기부 하단의 주름부분(요철부분)에 규칙적인 바람의 소용돌이가 발생되지 않도록 하는 것이 중요하다. 따라서 이의 저감대책으로 애자 주름부분의 공기의 흐름을 불규칙하게 하고, 애자면의 진동이 전이되는 것을 완화하기 위해 그림9와 같이 애자 풍소음 방지용 고무마개를 개발하여 KAIST 풍동시험장에서 풍소음 저감특성 시험을 시행하였다. 시험결과 1700~2000Hz 부근의 피크주파수에서 약 10~20dBA의 풍소음 저감효과가 있었으며, 시험 선로에 적용하여 실증시험 후 상용선로인 765kV 당진화력 송전선로와 345kV 삼해 송전선로에 적용하였다.

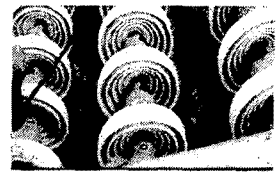
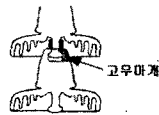
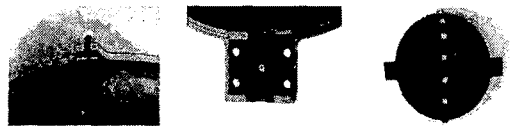


그림 9 애자 연결부의 고무마개 취부  
Fig. 9 Rubber packing for insulator

### 3.4 항공장애표시구 풍소음 저감 대책

항공장애표시구의 풍소음을 저감 대책으로 플랜지 접합 불량, 클램프의 유격, 배수구멍에서 발생하는 공명음을 근본적으로 방지하기 위하여 그림10과 같이 표시구의 형상을 개선하였다. 표시구의 반구(hemisphere) 접합용 요철(凹凸) 플랜지의 이완을 방지하기 위하여 플랜지 접합 부분에 2개의 고정장치(hinge bolt)를 추가하였으며, 전선을 완전히 장악하기 위하여 클램프 재질을 알루미늄(aluminum alloy)에서 EPDM(Terpolymer of Ethylene Propylene Diene Monomers)으로 교체하였고 배수공의 통풍방지를 위하여 배수공 내부에 부직포(nylon textile)를 부착하였다.[5]



(1) Hinge bolt 접합 (2) Strap(Al→EPDM) (3) 배수공(부직포)

그림 10 항공장애표시구의 형상 개선  
Fig. 10 Reform measure of the aviation beacon sphere

항공장애표시구에서 풍소음이 심하게 발생한 765kV 당진화력 및 신서산 송전선로에 설치되어 있던 표시구를 철거하고 개선된 표시구로 교체한 결과 풍소음은 발생되지 않고 있으며, 2002년 10월 이후부터는 개선된 항공장애표시구를 설치하고 있다.

## 5. 결 론

전기환경장애의 하나인 풍소음을 저감하기 위하여 풍동시험 및 실증시험을 통하여 풍소음의 발생 원인을 분석하고 저감방안을 연구하여 현장에 적용하였다.

풍소음원별 저감대책은 다음과 같다.

- ① 기선전선에는 대각밀착 4조방식의 Spiral Rod를 감고 신설 전선에는 저풍압 전선을 사용
  - ② 강관철탑에는 부재 단말부의 구멍을 밀봉
  - ③ 애자에는 바람의 소용돌이 방지용 고무마개 취부
  - ④ 항공장애표시구는 형상 및 재질 개선품 사용
- 그러나 철탑에 의한 풍소음 저감 대책은 구체적으로 연구된 사례가 없으므로 앞으로는 철탑부재 후방의 칼만와류의 저감방안에 대하여 연구가 수행되어야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 장재원, 김병걸, "신송전 시스템 기술개발 추진방안에 관한 연구", 한전연구보고서, pp.115-121, 2001.12.
- [2] 送電用新種電線專門委員會, 電氣協同研究 第43卷 第3號, 電氣協同研究會, pp.64-80, 1988.1.
- [3] 이동일, 신구용, 추장희, 이성두, "초고압 송전에 관한 III단계 연구", 전력연구원 연구보고서, pp.44-104, 2001.12.
- [4] 架空送電技能指導職WG, 架空送電設計の手引, 東京電力株式会社, pp.452-453, 1994.4.
- [5] 민병욱, 신태우, 항공장애표시구 풍소음 저감대책, 한국전력공사, pp.2-6, 2002.7.