

가공 송전설비의 소음 특성

°추장희*, 김상범*, 신구용*, 이성두*, 이동일*

Characteristics of Wind Noise from Overhead Transmission Facilities

Jang Hee Chu*, Sang-Beom Kim*, Koo-Yong Shin*, Seong-Doo Lee*,
Dong-II Lee*

ABSTRACT

This paper describes the characteristics of wind induced noise from high-voltage overhead transmission facilities which include transmission lines, insulator strings, and aviation beacon spheres installed on the overhead ground wires.

High-voltage overhead transmission lines generate an audible wind noise due to the alternate shedding of wind-induced vortices. The frequency spectrum from the insulator strings reveals its resonance peak. This resonance sound mechanism has been supposed the self-excitation phenomenon of the resonance and the velocity fluctuation. The booming noises from the aviation beacon spheres are detected and analysed.

1. 서 론

송전설비와 관련한 소음, 진동 문제는 전기적 잡음(electric noise), 유체 유발 진동(flow induced vibration), 그리고 wind noise를 들 수 있다. 전기적 잡음은 고전압 코로나 방전 소음으로 코로나 방전이 발생할 때 찌직거리는 험음이 발생한다. 유체로 인한 진동의 예는 송전선 주위에 불어오는 바람으로 인한 전선의 주기적인 흔들림으로 발생하는 전선 진동이 있다. 그리고 wind noise는 구조물에 빠른 속도의 바람이 부딪힐 경우 생기는 소리로, 물체 주위의 유동에 의해 소음이 발생하는 경우이다. 송전설비에서 발생하는 소음원은 철탑과

송전선, 송전선을 철탑에 지지하기 위한 절연 애자 장치, 그리고 항공장애표시구 등이 될 수 있다. 항공장애표시구는 항공기의 안전운항을 위하여 송전선에 직접 맞는 낙뢰를 방지하며 송전선로 단락 및 단선사고 시 보호계전기 동작신호 전송을 위한 고압송전선 위에 가선되어 있는 가공지선에 설치되어 있다. 송전설비에서의 wind noise는 대략 10 m/s 이상의 풍속에서 발생하며, 항공장애표시구는 5 m/s 이하에서도 발생하는 것이 관찰된다. 바람의 세기는 지상보다 상공에서 더 빨라지는데, 최근 송전설비의 고전압, 고용량화로 송전선의 높이가 높아지고 송전선의 도체수도 많아지므로, 송전설비 주변에서 wind noise의 발생 가능성이 증가하고

* 한전 전력연구원

있다.

철탑에서 발생하는 소음원은 구조물의 돌출부와 철탑 구조물을 구성하는 강관의 구멍에 의해서 휘파람 소리같이 발생할 수 있는데, 이에 대한 대책으로는 불필요한 구조를 제거하고, 뚫린 구멍을 막는 방법을 적용하고 있다. 송전선은 바람에 의해서 주기적인 진동이 발생하고 이 진동은 다시 유동에 영향을 미쳐 전선의 표면에서 와류의 박리에 의한 소음이 발생하고 있다. 이러한 소음을 줄이는 방법으로 전선의 표면을 매끄럽게 하지 않고, 돌출부를 형성하여 와류의 박리를 불규칙적으로 만들어 소음을 줄이는 방법이 적용되고 있다. 절연을 위하여 철탑지지물에 설치하는 애자장치로부터 소음이 발생하는 경우도 애자다발의 구조적인 특성과 공기 흐름이 결합하여 물체 주위의 압력변동으로 소음이 발생한다. 그리고 항공장애표시구에서도 소음이 발생하는 예가 있다. 애자장치와 항공장애표시구의 소음은 자주 발생하는 것은 아니지만 사람이 듣기에 성가신 음으로 방지 대책이 요구되고 있다.

본 논문은 고압 가공송전설비에서 송전선과 애자장치, 항공장애표시구에서 발생하는 wind noise의 특성을 기술하였고, 소음을 저감하는 방법을 조사하였다. 특히, 애자장치에서 발생하는 소음은 발생 메커니즘이 명확하지 않은 상태이므로, 이에 대한 선행연구 및 대책을 조사하여 논의하였다.

2. 전선의 소음 특성

가공 송전선에서 바람에 의한 소음은 물리적으로 물체 표면으로부터의 주기적인 유동 박리로 인한 비정상 하중의 변화 때문에 발생한다. 주기적으로 유동박리 영역에서 와류가 물체의 위아래 영역에서 교차적으로 떨어지고, 와류의 형태로 후류로 움직이게 된다. 주기적인 와류홀림 때문에 전체 유동장은 기본적으로 비정상 유동 특성을 갖는다. 이것이 원거리에서 소음의 형태로 방사하게 된다. 물체 주위의 유동장이 비정상운동을 하면 지속적인 와류의 홀림이 발생하는데 와류는 특정 주파수를 가

진 주기적인 특성을 갖는다. 이 주파수를 무차원화하여 Strouhal number라 하며 다음식과 같이 표현된다[1].

$$S = \frac{fd}{U} \quad (1)$$

여기서 f 는 와류 홀림주파수, d 는 물체의 직경, U 는 유체의 전방 속도이다. 유동의 특성이 바뀌지 않는 한 일정한 값을 가지며, 물체의 형상에 따라 차이가 있지만 대체로 0.1 - 0.2의 값을 가지며, 원형 송전선의 경우 넓은 대역의 Reynolds 수($10^3 \sim 10^5$)까지 0.2~0.22의 범위에서 Aeolian tone을 갖는다.

송전선로에서 발생하는 소음의 특성은 풍속과 도체의 단면의 형상에 관계되는 탁월주파수를 나타내므로 전선의 단면 형상을 변경하여 항력과 소음을 저감하는 방법을 적용한다. 국내에서도 송전선의 항력저감 및 소음에 관한 수치 해석연구가 수행된 바 있다[2,3]. 한전에서 사용하는 345 kV 송전선의 형상은 단면이 원형으로 직경이 약 30 mm 정도이다. Wind noise의 발생을 줄이기 위하여 전선의 단면모양을 변경하여 항력과 소음 및 표면 전계강도분포를 검토하여 저소음전선을 개발하였다. 그림1은 기존의 Cardinal 전선과 개발한 저소음 전선의 단면 형상을 보인 것이다. 개발된 전선의 단면은 원형에서 대각으로 돌출부분을 갖는 형상으로 만들었다.

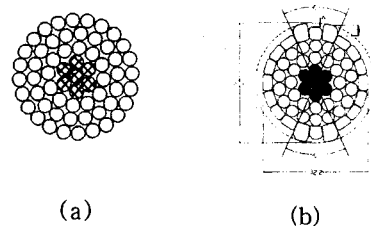


Fig. 1 Cross sectional shapes of cables,
(a) Cardinal type,
(b) LN-Grackle type.

그림 2는 전선의 형상에 대하여 풍속 22.4 m/s에서의 음압레벨을 측정할 결과를 보여주는 것이며,

실험결과를 정리하여 표 1에 보였다. 풍동실험은 KAIST의 저소음 풍동실험장을 이용하였으며, 흐름에 직각으로 2도체를 나란히 배치하여 측정하였다. 저소음 전선이 기존 전선보다 피크 값을 기준으로 할 때에 8.1 dBA의 감쇄를 보였다. 그리고 최대 피크 위치가 넓게 분산되었으므로 실제적으로 피크 소음의 저감 효과는 더 클 것으로 기대된다.

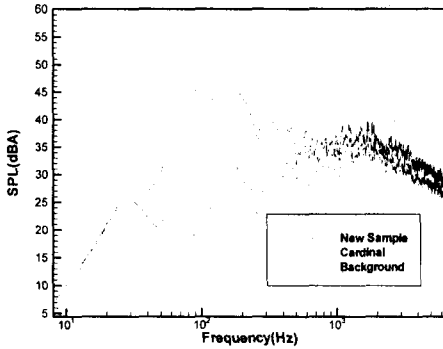


Fig. 2 Sound pressure level for cables at wind speed of 22.4 m/s.

Table 1. Results of wind tunnel test for cables at V=22.4 m/s.

Wire Type	Peak Frequency (Hz)	Peak SPL (dBA)	OSPL (dBA)
Cardinal	103.6	54.4	63.6
LN-Grackle	159.7	46.3	62.6

이미 설치되어 있는 선로에서 발생하는 소음을 저감하는 대책으로는 원형도체에 spiral rod를 감아서 도체 표면에 돌출부를 형성하여 소음을 줄이는 방법을 개발하여 시험을 수행하였다[4]. 신설 선로에는 저소음전선을 사용하는 방안과 원형도체가 설치되어 있는 기선로에는 spiral rod 공법을 병행하여 적용할 계획이다.

3. 애자장치의 소음 특성

애자장치에서 발생하는 소음은 비교적 높은 풍속과 특정한 풍향에서 크게 발생하므로 일상에서 자주 듣게 되는 것은 아니므로 이에 대한 연구는 상대적으로 많이 되어 있지 않다. 그러나 송전설비의 높이가 높아지고 초고압송전 설비에서는 발생할 가능성이 있으며, 민가 근처로 지나가는 선로에서 대해서는 대책을 강구해야 할 필요성이 대두되고 있다.

애자소음 특성을 조사하기 위하여 먼저 애자의 모양에서 나타나는 음향특성을 조사하였다. 그림 3에 애자의 모양을 나타내었다. 고압 송전용 애자는 갓 안쪽에 주름을 주어 절연거리를 길게 하도록 고안되어 있다. 애자의 갓부분 외경과 애자 사이의 간격 및 갓 안쪽에 있는 주름의 깊이와 너비는 애자의 종류에 따라 다르다. 애자의 연결은 그림에 나타난 볼을 다음 애자의 소켓에 끼우도록 되어 있다.

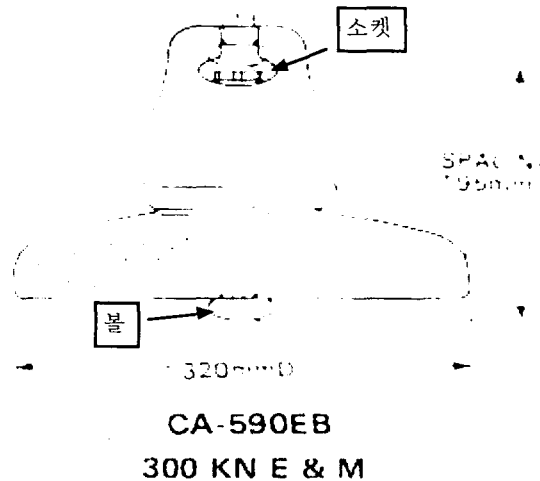


Fig. 3 Profile of a insulator of 300 kN.

그림 4는 애자소음을 측정할 무향 풍동 실험장의 개요도이다. 시료는 일본 NGK 회사의 300 kN 애자 2개를 연결하여 풍속과 애자 밑면을 기준

으로 풍동의 바람 토출구의 방향 사이의 각도(θ)를 조절하면서 측정하였다.

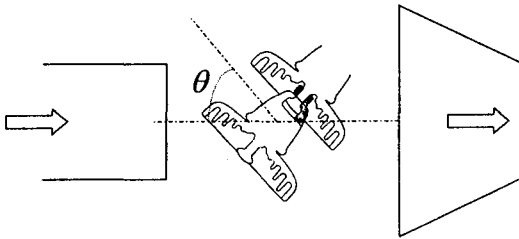


Fig. 4 Configuration of experimental set up.

먼저 풍속의 변화에 대한 소음특성은 그림 5에 보였다. 풍속이 17 m/s 이하에서는 소음의 특성이 잘 나타나지 않았으며, 23 m/s에서 뚜렷한 피크음이 발생하였으며, 이 피크는 풍속이 증가할수록 음압레벨이 증가하다가 풍속이 더 증가하면 오히려 줄어드는 경향을 보였다. 바람의 입사각에 대해서는 애자의 주름의 끝단에 평행하게 입사하는 각 이상의 각도에서 피크가 나타났으며, 입사각도가 커질수록 음압레벨이 증가하였다.

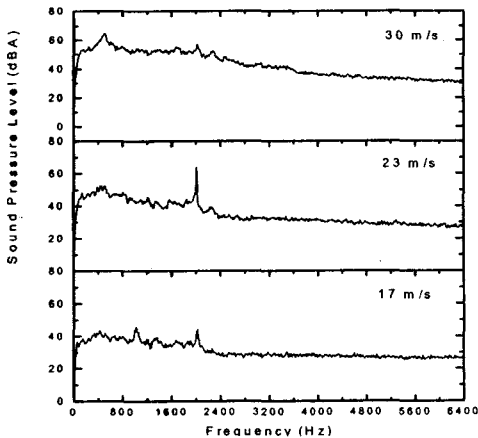


Fig. 5 Sound characteristics of insulators with respect to wind speed at wind direction of 30° .

이 피크음의 원인을 알아보기 위하여 애자 형상의 주름부분을 막으면서 측정해 보았다. 주름은 갖

의 바깥에서부터 번호를 붙여서 부르기로 한다. 모든 주름을 모두 막지 않은 경우 1672 Hz와 2040 Hz의 피크가 나타났으며, 첫 번째와 두 번째의 주름을 각각 막은 경우 피크음은 현저하게 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 세 번째 주름을 막은 경우에는 다시 피크음이 나타났으며, 모두 막고 첫 번째 주름만 막지 않은 경우에는 스펙트럼에서 1672 Hz 부근이 조금 변화하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로 애자는 고유의 음향주파수를 갖고 있으며, 이것은 애자 밑면의 굴곡 모양에 기인하는 것으로 판단된다.

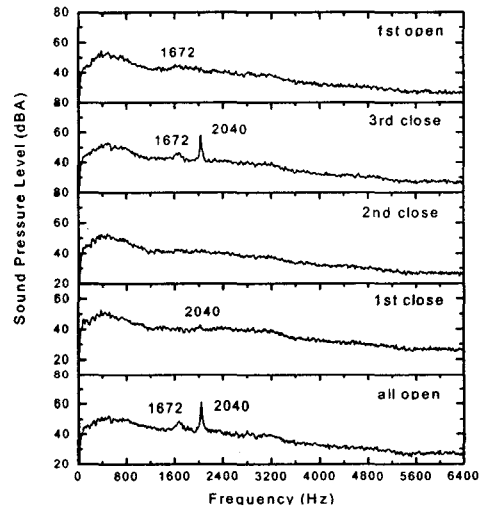


Fig. 6 Sound characteristics of insulators at 23 m/s and wind direction of 30° .

그러나 현장에서 발생하는 애자 소음은 애자의 구조에서 발생하는 1 kHz 이상의 피크음보다 400 Hz~600 Hz의 저음이 탁월하게 발생하는 것으로 알려져 있다[5,6]. 그러나 우리는 아직까지 현장에서 애자소음을 구분하여 측정할 수가 없다. 그래서 앞의 선행연구결과를 자세히 검토하여 이 음의 발생 메커니즘을 이해하고자 시도하였다. 프랑스[5]와 일본[6]에서 수행한 선행 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 애자를 다수(8개 이상)로 연결하면 격자를 형

성하여 애자의 모양, 크기 및 간격에 따라 다른 고유음향주파수가 발생하는 고유 음향공명체를 형성한다.

(2) 애자다발에서 발생하는 음향주파수는 애자 연결 개수에는 무관하고, 애자의 갓 외경에 거의 반비례하는 특성을 갖는다. 예를 들어, NGK에서 생산하는 갓의 외경이 320 mm인 300 kN 애자에서는 540 Hz의 음이, 340 mm의 400 kN 애자에서는 460 Hz의 음이 발생하는 것으로 보고되어 있다.

(3) 이 음은 애자의 기계적인 공명주파수가 아니므로 애자의 재질에 영향을 받지 않는다. 또 애자 고리의 진동에 의해서 발생하는 것이 아니므로 연결부분에 고무패킹을 해도 발생한다.

(4) 이 음은 특정한 풍속에서 (9 m/s, 14 m/s 등) 탁월하게 발생한다.

(5) 애자 소음은 애자의 연결에 의해 고유 음향공명체가 형성되어 주름부의 흐름과 공명음이 결합하여 발생하는 것으로 판단된다.

그리고 이들은 대책으로 그림 7 (A, B)와 같이 애자 돌기부분에 부착물을 붙여서 흐름을 불규칙적으로 만들어 주는 방법(a)과 애자다발의 규칙적인 주기성을 변경하기 위한 애자 갓에 부착물을 붙이는 방법(b)을 제시하였다[5, 7].

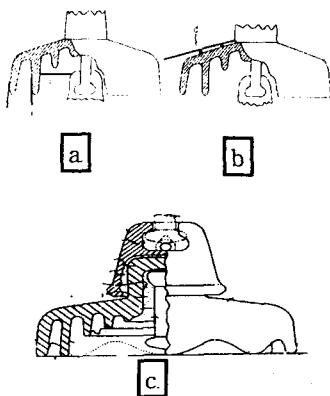


Fig. 7 Modified shapes of insulator.

또한, 애자의 주름에 의한 소음을 줄이기 위해서는 주름의 모양을 변경하는 방법이 가능한데 이에 대하여 애자 제작회사인 NGK 사에서는 그림 7 c와 같이 애자 굴곡부의 모양을 변경한 소음방지 애자를 개발하여 특허를 출원하였다[8, 9]. 현재 사용하고 있는 모양은 주름의 끝단이 같은 평면에 놓이게 되어 있는데, 일정한 주름 깊이에 의한 공명효과를 줄이기 위하여 주름의 깊이를 외주 주름에서 안쪽 주름 끝을 잇는 선의 각도가 40° 이상 되도록 하는 방법과 주름 둘레에 굴곡을 주도록 하며, 첫 번째 주름의 굴곡과 두 번째 주름의 굴곡을 어긋나도록 하여 공동의 효과를 최소화하면서도 총연면 거리(creepage length)는 그대로 유지하는 디자인으로 소음을 저감한 결과를 제시하고 있다.

그러나 일본의 Hitachi 사에서는 이 음이 애자 연결에 의한 진동이 음과 결합하여 발생하는 과정으로 설명하면서, 공력탄성적인 공명음을 방지하는 방법으로 애자 외주에 돌기를 설치하는 방법 외에 방진기구를 부착하는 방법을 고안하여 제시하고 있다. 제안된 방진기구는 애자 연결 부분의 소켓구멍을 막는 고무마개로, 그림 8과 같이 이를 실제 적용하여 풍소음을 저감시켰다는 결과를 제시하였고[10], 이 고무마개에 대한 특허를 일본특허청에 다수 출원하였다[11, 12]. 일본의 관서전력과 동경전력회사에서는 이 방법을 현장에 적용하고 있다.

이상의 결과로부터 애자공명음을 저감하는 방법으로는 애자의 갓 외주에 돌기를 부착하거나 주름 모양을 변경하는 방법이 공통된 대책으로 알려져 있음을 알았다. 고무마개와 같은 방진기구의 효과는 애자소음의 발생 매커니즘 규명과 함께 더 연구해야 할 부분이다.

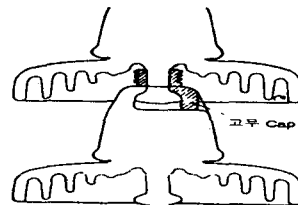


Fig. 8 Silicon cap

4. 항공장애표시구의 소음 특성

우리 나라 항공법에 따르면 항공보안설비의 구분을 항공보안무선시설, 항공등화, 주간장애표지로 나누어 규정하고 있다. 가공송전선의 경우에는 항공장애등과 주간장애표지를 설치해야 하는데, 한전에서서는 철탑에 항공장애등을 설치하며, 주간장애표지로는 황적색의 구를 송전선로 위로 지나가는 가공지선에 달아서 운용하고 있다. 가공선에 설치하는 표시물의 기준은 직경이 50 cm 이상의 구형으로서 적색, 황적색 또는 백색 중 1 색인 표시물의 45 m의 전 간격에 설치하도록 되어있다. 한전에서 사용하는 항공장애표시구의 모양은 그림9와 같다. 속이 빈 반구를 요철모양의 집합부를 맞추어 선로에 클램프 부분을 나사로 고정하도록 구성되어 있다. 구의 크기는 직경이 610 mm이고, 클램프부분은 두께가 24 mm, 너비가 110 mm이며, 길이는 85 mm 이다. 구 내부로 스며든 물을 배출하기 위한 구멍이 직경 8 mm 정도로 선로방향에 직각으로 가운데 구면에 5개씩 뚫어져 있다.

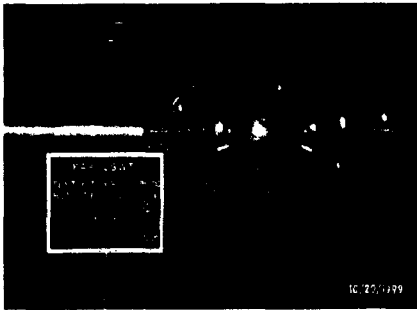


Fig. 9 Profile of an aviation beacon spheres.

항공장애표시구에서 발생하는 소음을 현장에서 측정된 스펙트럼을 그림에 나타냈다. 그림 10에서 (a)와 (b)는 서로 다른 장소에서 측정한 결과이며, (c)는 구의 공명음 스펙트럼을 나타낸 것이다. 구의 공명음을 살펴보면 첫 번째 피크인 386 Hz를 기본 주파수로 하고, 이에 대한 고차의 Bessel 함수 해를 구하면 스펙트럼에 나타난 피크와 같이

나타난다. 이로서 이것은 구의 공명주파수임을 확인하였다. 스펙트럼 앞쪽에 나타나 있는 46 Hz는 구에 뚫어져 있는 직경 8 mm인 10개의 구멍에 의해서 발생하는 Helmholtz 공명음에 해당된다. 현장 측정음의 스펙트럼은 넓은 주파수 대역의 탁월음이 표시구의 공명음과 주변 잡음 피크가 섞여서 나타나는 것을 볼 수 있다. 소음의 탁월 주파수는 표시구의 상태와 주변의 조건에 따라 다르게 발생하는 것으로 생각된다.

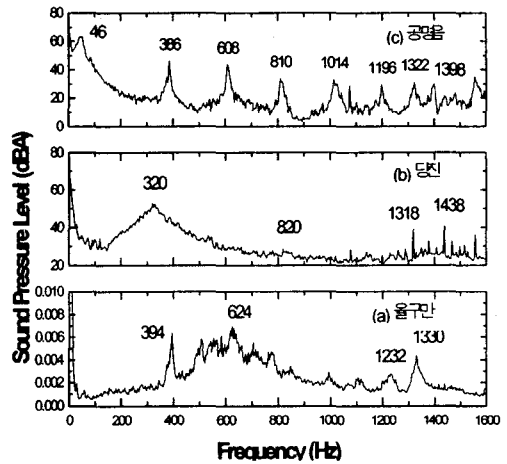


Fig. 10 Characteristics of sound from aviation beacon sphere.

- (a) Spot measurement sound at Yulkuman,
- (b) Spot measurement sound at Dangjin,
- (c) Resonance spectrum of sphere.

항공장애구에서 소음이 발생하는 경우를 살펴보면, 공중에서 바람에 의해 미풍진동이 발생하고 있는 전선 위에 설치되어 있는 표시구의 클램프 조임부의 나사가 풀리거나 반구가 어긋나게 맞추어져 불완전하게 집합된 경우 틈이 만들어지고, 이 틈을 통하여 전선 진동의 영향과 함께 센 바람에 의하여 booming이 발생하는 것으로 판단된다. 구의 집합부가 잘 결합되어 있을 때는 소음이 발생

하지 않았다. 현장에서 확인한 결과로는 클램프 부분의 볼트 조임 상태가 풀렸을 때에 접합부의 틈이 벌어지며, 볼트 조임 상태가 단단한 경우에도 구의 접합부에 틈이 벌어진 경우가 보고 되고 있다. 이러한 현상을 막기 위해서는 현재 사용하는 구의 모양을 공중 작업을 용이하도록 하면서, 바람과 진동의 영향을 받아도 구의 접합부가 잘 벌어지지 않는 디자인으로 보완해야 할 것으로 판단된다. 또한 가공선로가 바람에 의해 지속적인 진동을 일으켜 볼트 조임이 완화되는 현상도 보완하여야 할 부분으로 지적된다. 구의 설치상태가 불량할수록 (틈이 많이 벌어진 경우) 낮은 풍속에서 높은 풍속 범위까지 넓은 풍속범위에서 소음이 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며, 다소 양호한 상태의 설치 상태는 낮은 풍속에서나 아주 높은 풍속에서는 오히려 소음이 발생하지 않는 것을 관찰하였다.

항공장애표시구의 설치상태는 작업 시 제대로 설치하지 않은 경우와 또 초기에는 제대로 설치되어 있어도 시간이 경과하면서 상태가 불량해지는 결과로서 이는 제품의 견고성과 작업성을 개선하는 보완방법을 검토하고 있다.

5. 결 론

가공 송전설비에서 발생하는 소음의 특성을 조사하고, 전력회사에서 적용하고 있는 대책을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 전선에서 발생하는 소음은 도체 직경과 풍속에 관련이 있는 탁월 주파수의 음이 발생하는데, 이것을 줄이는 방법으로는 전선의 표면에 돌출부를 갖는 모양의 전선을 개발하여 표면에서의 와류의 박리를 불규칙적으로 만들어 항력저감과 소음을 저감하는 방법으로 적용하고 있다.
2. 애자장치의 소음은 높은 풍속에서 발생하는 현상으로 민가와 인접한 송전철탑에서 발생하는 것이 문제가 되는데, 프랑스, 이탈리아, 일본의 경우 10여년 전부터 연구를 하여 대책을 제시하였다. 그러나 이 소음의 발생 원인에 대하여는 명확하지

않고, 애자의 연결에 의해 고유 음향공명체가 형성되어 주름부의 흐름과 공명음이 결합하여 발생하는 것으로 추정하고 있다. 대책으로는 유동이 효과적으로 음과 결합하지 못하도록 애자다발의 주기성을 바꾸어주는 방법과 애자의 모양을 변경하는 방법이 제시되고 있다. 그러나 일본의 경우 애자의 연결부분에 생기는 구멍을 막아서 발생음을 저감한 결과를 얻어서 현장에 적용하고 있는데, 이에 대한 효과는 향후 더 검증해 보아야 할 것으로 생각된다.

3. 가공선로에 항공장애표시구를 설치하여 운용하는 우리의 경우는 이것에서도 wind noise가 발생하였는데, 이 원인은 설치상태의 불량으로 구에 틈이 생겨 booming noise가 발생하는 것으로 판단되었다. 향후 공중에서 강한 바람에도 잘 견디도록 내구성능을 증가시킨 표시구의 디자인 개선과 계속적으로 진동이 발생하는 가공선로에서 견고하게 설치되어 있도록 하는 방법을 같이 보완하여 개선하여야 할 점으로 지적하였다.

참고문헌

1. Robert D. Blevins, Flow-Induced Vibration(Van Nostrand Reinhold, 1990).
2. 이덕주, "송전선의 항력저감 및 소음에 관한 수치 연구", '98 전력기술 기초연구 성과발표 논문집, pp.623-625 (기초전력공학공동연구소, 서울대학교, 1998).
3. 윤태석, 이수갑, "송전선의 항력저감 및 소음에 관한 수치 연구", '98 전력기술 기초연구 성과발표 논문집, pp.626-630 (기초전력공학공동연구소, 서울대학교, 1998).
4. 이동일, 신구용, 추장희, 김상범, 이성두, 김정부, "765 kV 송전선로의 풍소음 발생특성과 대책연구", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2005-2007.
5. H. Arbey, M. Morpau, J. Delcambre, R. Michaud, L. Pargamin, and J. M. Parot, ", International Conference on Large High Voltage Electrics Systems, Aeolian Noise from Electrical Lines(CIGRE) Stockholm Symposium, 232-05 (1985).

6. H. Kumagai, " Aerodynamic Noise Generated from an Insulator String" Komae Research Laboratory, Report No. T86028, CRIEPI, JAPAN, 1986.
7. Kumagai Hiromichi, Sagawa Toshio (CRIEPI), "Wind Noise Prevention for Suspension Insulator String", JP63152822A2, 일본특허청 (June 25, 1988).
8. Suzuki Yoshihiro, Ogawa Shigeru, Wakamatsu Hiroyuki(NGK), "Noise Preventing Insulator", JP4301323A2, 일본특허청 (Oct. 23, 1992).
9. Imakoma Takashi, Suzuki Yoshihiro, Wakamatsu Hiroyuki(NGK), "Noise Preventing Insulator", JP5067407A2, 일본특허청 (March 19, 1993).
10. K. Tsujimoto, S. Furukawa, K. Shimojima, and K. Yamamoto, "Development of NS-TACSR with Extremely Suppressed Aeolian Noise and its Application to 500 kV Overhead Transmission Line", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.6, 1991, pp.1587-1592.
11. Kawakami Takashi, Undou Katsuyoshi, Shimojima Kiyoshi(Hitachi Cable LTD) "Noise Preventor for Insulator", JP61114412A2, 일본특허청 (June 2, 1986).
12. Kumofuji Katsuyoshi (Hitachi Cable LTD), "Insulator Noise Suppressor" JP8161949A2, 일본특허청 (June 21, 1996).