한국소음진동공학회 창립10주년 기념 소음진동학술대회논문집, pp.1842~1847.

# 초고압 송전용 애자의 풍소음 특성

°추장희*, 김상범*, 신구용*, 이성두*, 이동일*

# Aeolian Noise from High Voltage Insulators

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

## ABSTRACT

In this paper, a review is attempted for understanding of aeolian noise from high voltage insulators and their aerodynamic noise characteristics were investigated using the low noise wind tunnel. The noise from the insulators was dependent upon the wind speed and their orientation relative to the wind direction. The noise spectrum revealed sharp peak which was found the cavity resonance frequency.

## 1. 서론

송전설비와 관련한 소음진동 문제는 전기적 잡음(electric noise), 유체 유발 진동(flow induced vibration), 공력소음(aerodynamic noise) 등을 들 수 있다. 이 중에서 전기적인 소음은 코로나 소음으로 고전압 코로나 방전시 발생하는 딱딱거리는 소음이다. 전선 주위에 불어오는 바람으로 인한 전선의 주기적인 흔들림으로 발생하는 송전선의 진동은 3 Hz에서 150 Hz에 걸쳐 나타나며, 주기적인 진동으로 전선접합부에 피로파괴를 유발할 수 있으며, 이로부터 hum 음이 발생되기도 한다. Wind noise 또는 aeolian noise 라고도 하는 공력소음은 구조물에 빠른 속도의 바람이 부딪힐 경우 생기는 소리와 같이 물체 주위의 유동에 의해 소음이 발생하는 경우이다. 최근의 송전설비의 고전압, 고용량화로 송전선의 높이가 높아지고, 송전선의 도체수도 증가하여 송전설비 주변에서 공력소음의 발생 가능성이 높아지고 있다. 우리나라에서는 주택지 근처에 송전탑이 위치한 경우도 종종 있어서 민가의 안정적인 생활을 위하여 이러한 송전설비에서 발생하는 소음문제를 해결하고자 하는 노력을 기울이고 있다.

고체가 유체 중에서 진동하면 주변의 유체에 압력변동이 생겨 그것이 음파를 발생시켜 전파한다.

* 한전 전력연구원

그러나 고체가 진동하지 않고도 음이 발생하는 현상도 있으며, 그것은 음파를 전하는 매질의 압력변동에 의한 경우로 이러한 것을 공력소음이라고 한다. 애자로부터 발생하는 풍소음도 그 한 예로 애자표면의 공기흐름의 박리현상에 의한 유체주위의 압력변동으로 박리의 위상이 불규칙하게 되기 때문에 맥놀이 형태의 소음으로 되는 경우가 많이 발생한다.

유동이 물체에 가하는 힘은 크게 유동에 의한 힘과 유체 자체에 의한 힘으로 나눌 수 있다. 유동에 의한 힘은 공력학적 압력분포에 의한 힘, 점성에 의한 힘, 와류 및 난류에 의한 힘이 있다. 물체 근처에 유동이 지나면 물체의 끝단에는 와류가 발생한다. 이 와류의 형태는 물체의 형상과는 큰 상관이 없는 Karman 와류로 알려진 서로 엇갈린 형태를 띠며 주기성을 가진다. 이러한 와류가 물체에서 떨어져 나갈 때 물체 표면에 압력이 비대칭성을 띠어 물체에 가진력이 가해진다. 와류에 의한 물체에 가해지는 이 힘은 일정 주파수를 가지므로 공진점 근처에서는 진동에 아주 큰 영향을 주며 공력소음의 주요한 원인이 될 수 있다. 점성에 의한 힘과 난류에 의한 힘은 각각 일정한 크기와 불규칙적인 값을 가지므로 진동에 미치는 영향은 적다. 유체 자체에 의한 힘은 진동에 의해 유도되는 힘으로서 크게 음향방사에 의한 댐핑과 구조 표면에서 구조진동과 상(phase)이 다른 방사파에 의해 발생하는 부가질량 효과로 나타난다.[1, 2]

또한 물체의 진동에 의해서 와류가 물체의 진동수로 발생하는데 이를 락온(lock-on)이라고 한다. 와류의 주기를 표현하는 무차원 수로 Strouhal 수가 있다.

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

여기서 $f$는 주파수, $d$는 물체의 직경, $U$는 유체의 속도이다. 이 Strouhal 수는 유동의 특성이 바뀌지 않는 한 일정한 값을 가지며, 물체의 형상에 따라 차이가 있지만 대체로 0.1 - 0.2의 값을 가진다. 따라서 와류 박리 주파수는 유체속도에 선형적으로 비례하고 진동이 다시 가진력을 유발하는 자려진동(self-excited vibration) 메커니즘으로 진동이 발생한다.

본 논문에서는 저소음 풍동을 이용하여 애자의 소음 특성을 조사하였다. 그리고 고압 송전용 애자에서 발생하는 풍소음의 음원과 대책에 대해서 살펴보았다.

## 2. 애자의 소음 측정

그림 1에 보인 송전설비에 설치된 애자장치에서 강풍시 특수한 소리가 발생하는 것이 보고 되고 있다. 이것은 특정 풍향, 풍속 범위에서 발생하며, 송전선의 고전압화에 따라 높이가 높아져 바람의 영향을 많이 받게 되어 발생빈도가 높아지고 있다. 이에 대한 대책을 모색하기 위하여 먼저 애자의 음향 발생 현상을 조사하였다.

실험에 사용한 애자의 모양은 그림 2와 3에 나

그림 1. Polymeric chains as insulators.

타내었다. 애자의 갓부분 외경D와 연결했을 때의 간격 및 갓 안쪽에 있는 주름의 깊이(h)와 너비(w)는 애자의 종류에 따라 다르다. 고압 송전용 애자는 갓 안쪽에 주름을 주어 절연거리를 길게 하

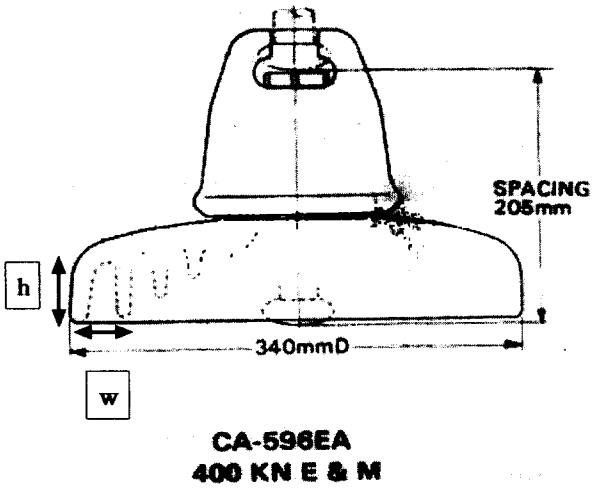


그림 2. Profile of a insulator of 400 kN.

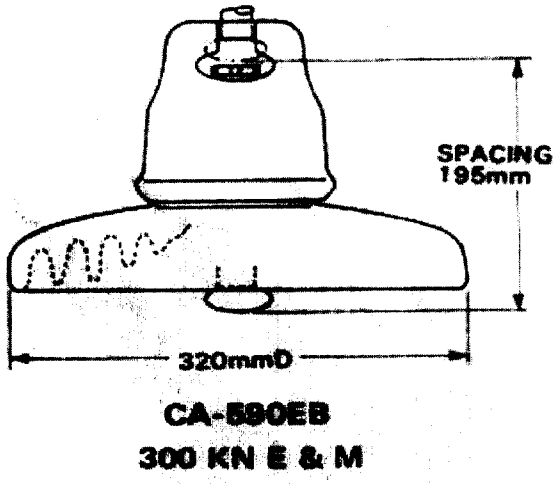


그림 3. Profile of a insulator of 300 kN.

도록 고안되어 있다. 그림에 보인 애자는 345 kV, 765 kV 송전선로에 사용하는 애자로 일본의 NGK 회사의 제품이며, 그림 2에 보인 제품은 electromechanical failing load가 400 kN이며, 총 creepage distance가 525 mm인 모델 CA-596EA 이며, 그림 3에 보인 것은electromechanical failing load가 300 kN이며, creepage distance가 460 mm인 CA-590EB 모델이다. 애자의 연결은

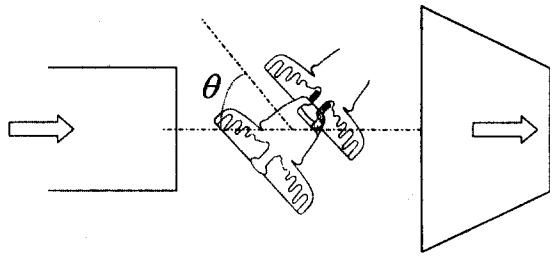


그림 4. Configuration of experimental set up.

그림에 나타난 볼을 다음 애자의 소켓에 끼우도록 되어 있다.

그림 4는 소음을 측정한 무향 풍동 실험장치의 개요도이다. 애자에서 발생하는 소음은 풍속과 애자에 입사하는 바람의 방향에 영향을 받으므로, 풍속을 변화시키면서 애자 밑면을 기준으로 풍동의 바람 토출구의 방향 사이의 각도 ( $\theta$)를 조절하면서 측정하였다. 풍동은 KAIST 항공우주공학과의 무향풍동실을 이용하였다. 표 1에 사용한 애자의 규격을 나타내었다.

Table 1. 애자의 규격.

| 규격(mm) | 400 kN 애자 | 300 kN 애자 |
|---|---|---|
| 갓 외경 (D) | 340 | 320 |
| spacing (p) | 205 | 195 |
| h1 | 51 | 42 |
| h2 | 47 | 42 |
| w | 22 | 18 |
| 주름수 | 4 | 4 |

h1: 갓 바깥에서 첫 번째 주름 깊이
h2 : 갓 바깥에서 두 번째 주름 깊이
w : 주름 너비

## 3. 실험결과 및 토의

먼저 풍속의 변화에 대한 소음특성은 그림 5에 보였다. 풍속이 17 m/s 이하에서는 소음의 특성이 잘 나타나지 않았으며, 풍속이 증가할수록 음압레벨이 증가하는 특성을 보였다. 풍속이 더 증가하면

특정 피크의 소음이 줄어드는 경향을 보였다. 그림 6에는 애자의 주름으로 입사되는 바람방향에 대해 소음을 측정한 결과를 나타내었다.

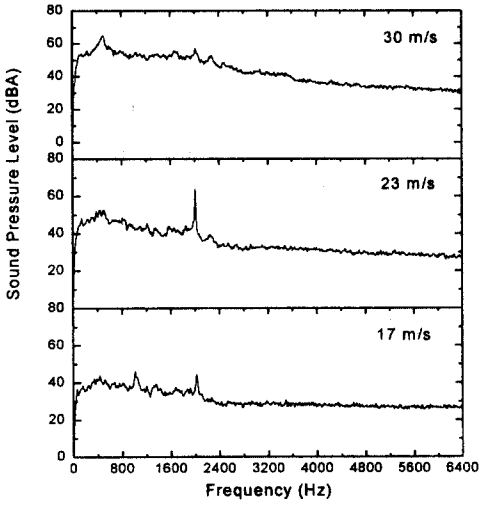


그림 5. Sound characteristics of 300 kN insulators with respect to wind speed at wind direction of 30° .

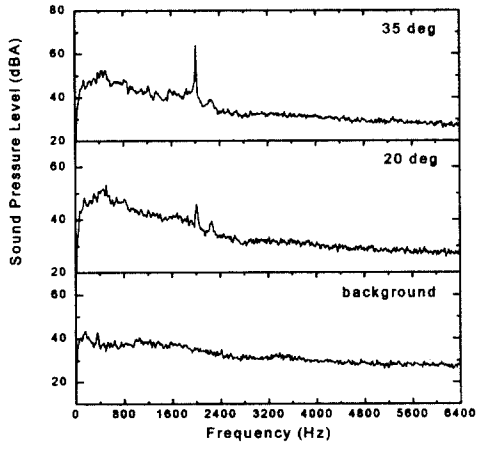


그림 6. Sound characteristics of 300 kN insulators with respect to wind direction at 23 m/s.

바람의 입사각도가 증가할수록 소음원의 레벨이 크게 나타났다. 입사각도는 애자의 주름의 끝단에 평행하게 입사하는 각도 이상에서 소음이 발생하였다.

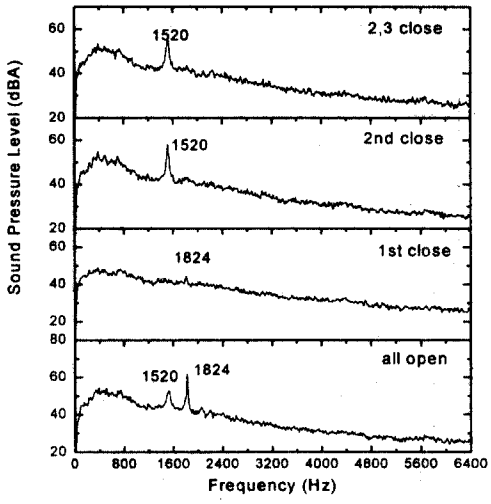


그림 7. Sound characteristics of 400 kN insulators at 23 m/s and wind direction of 30° .

그림 7은 애자의 주름 영향을 조사하여 나타낸 실험 결과이다. 주름은 애자 갓의 바깥에서부터 번호를 붙여서 부르기로 한다. 모두 열어 놓은 상태에서 측정한 소음의 특성은 그림의 맨 아래에서 보는 바와 같이 2군데 피크가 나타났다. 첫 번째 주름을 막으면 1520 Hz 피크가 사라지고 약하게 1824 Hz 피크는 나타났다. 두 번째 주름을 막으면 반대로 1520 Hz 피크가 나타났으며, 두 번째와 세 번째의 주름을 동시에 막았을 경우도 1520 Hz의 피크만 나타났다. 백색음을 입사했을 때의 소음 특성을 조사한 결과도 풍동에서와 같은 특성을 보임을 알 수 있었다.

300 kN 애자의 경우는 그림 8에 나타내었다. 300 kN의 경우 주름을 모두 막지 않은 경우 1672 Hz와 2040 Hz의 피크가 나타났으며, 1672 Hz의 피크는 첫 번째 주름에 영향을 받는 것으로 보이며, 2040 Hz의 피크는 두 번째 주름과 연관이 있는 것으로 생각된다.

공동(cavity)은 자동차의 표면에 있는 홈, 항공

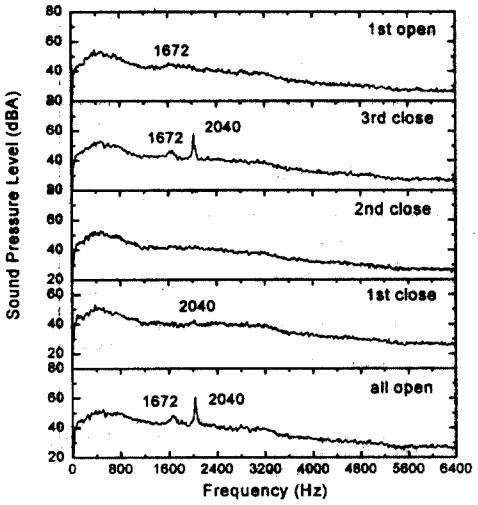


그림 8. Sound characteristics of 300 kN insulators at 23 m/s and wind direction of 30° .

기의 투하 격실, 철도차량의 객실 연결부에 있는 공동, 분지배관 계통, 가스관의 분지관 등에서 응용되는 중요한 유동 형태로 알려져 있다. 공동은 열린 공동(open cavity)과 닫힌 공동(closed cavity)으로 구분하며[3,4], 열린 공동이란 공동의 전단에서 이탈된 전단 흐름이 공동의 후미 모서리에 부딪치는 유동구조를 갖는다. 대략적으로 공동의 깊이(h)에 대한 공동 길이(w)의 비가 h/w = 7 ~ 8 정도를 기준으로 그 이하를 열린 공동으로 구분한다. 열린 공동은 얕은 공동(shallow cavity)과 깊은 공동(deep cavity)으로 나누어지며, h/w = 1 이하를 얕은 공동이라 한다. 깊은 공동의 압력변동으로 박리의 위상이 불규칙하게 되기 때문에 맥놀이 형태의 소음은 깊이에 의한 음향 공진 모드의 특성을 갖고 공동 입구의 와류 흐름은 가진력으로 작용하여 공명기와 같은 음향 방사 특징을 지니는 것으로 알려져 있다.

애자 소음의 스펙트럼에 나타난 피크음의 원인을 알아보기 위하여 주름의 깊이에 대한 공명음의 주파수를 계산해 보았다. 각각의 주름은 열린 관으로 고려할 수 있으며, 열린 관의 기본 공명음은 관 길이가 $\lambda/4$ 에 해당하게 되므로 애자의 주름 깊이에 해당하는 각각의 공명음은 다음과 같다.

Table 2. 애자 주름의 공명주파수

| 애자 종류 | | 공명주파수 (계산치) | 공명주파수 (측정값) | (h/w) |
|---|---|---|---|---|
| 400 kN | h1 | 1666 Hz | 1520 Hz | 2.3 |
| | h2 | 1808 Hz | 1808 Hz | 2.2 |
| 300 kN | h1 | 2023 Hz | 1672 Hz | 2.3 |
| | h2 | 2023 Hz | 2040 Hz | 2.3 |

애자의 주름은 열린 공동으로 깊은 공동에 해당하며 간단히 열린 관의 공명에 해당하는 주파수의 음이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 결과로부터 애자 형상에서 발생하는 풍소음은 애자의 주름(두 번째)에 의해 생기는 공명음으로 판단된다. 그리고 애자의 소음은 풍속과 풍향에 따라 음압레벨이 변화하는 결과를 얻었다. 그러나 첫 번째 주름의 영향을 받는 피크음은 첫 번째 주름의 공명음과는 다른 주파수의 음이며 발생 메커니즘은 앞으로 규명해야 할 점으로 남아 있다.

애자의 주름에 의한 소음을 줄이기 위해서는 주름의 모양을 변경하는 것이 필요하다. 현재의 고안은 주름의 끝단이 같은 평면에 놓이게 되어 있는데, 일정한 주름 깊이에 의한 공명효과를 줄이기 위하여 주름 둘레에 굴곡을 주도록 하며, 첫 번째 주름의 굴곡과 두 번째 주름의 굴곡을 어긋나도록 하여 공동의 효과를 최소화하면서도 총 creepage 거리는 그대로 유지하는 것이 하나의 방법으로 고려된다.

송전설비 풍소음의 문제는 우리나라와 같이 국토가 좁아서 송전설비가 민가 근처에 있는 경우에 문제가 증가되며, 계절풍의 영향을 받는 기상조건에도 많은 영향을 미친다. 프랑스[5]와 일본[6]에서는 이에 대한 원인 규명에 대한 연구를 수행한 바 있다. 선행연구 결과에서는 애자를 다수로 연결하면 격자를 형성하여 애자의 모양, 크기 및 간격에

따라 다른 고유음향주파수가 발생해 애자장치는 고유 음향공명체를 형성한다. 이 때 애자의 갓 외경에 거의 반비례하는 고유음향주파수가 크게 발생하며, 모델 CA-596EA 인 경우 540 Hz의 음이 발생하였다[6]. 이들은 이 음이 애자 연결에 의한 기계적인 진동에 의한 음이 아닌 것으로 설명하고 있다. 그러나 다른 논문[7]에서는 이 음이 애자 연결에 의한 진동이 음과 결합하여 발생하는 과정으로 설명하였으며, 이들은 대책으로 애자연결 부분에 고무마개를 끼워서 풍소음을 저감시켰다는 결과를 보고 한 바도 있다. 애자 풍소음은 애자의 연결에 의해 고유 음향공명체가 형성되어 주름부의 흐름과 공명음이 결합하여 발생하는 것으로 설명하고 있다.

본 연구의 실험에서는 540 Hz의 저주파수의 음보다 1808 Hz의 고주파수의 음이 크게 나타났으며, 이 음의 발생원은 애자의 두 번째 주름에 의한 것으로 판단된다. 서로 다른 연구결과에 대한 확인과 긴 애자다발에 대한 실험을 수행하여 애자의 풍소음 발생 메커니즘 규명과 대책은 후속연구로 남아 있다.

## 후기

풍동시험을 해 주신 KAIST 항공우주공학과 이덕주 교수님과 연구원들에게 그리고 여러 가지 조언을 해 주신 한국표준과학연구원 정성수 박사님께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

[1] Fahy F. "Sound and structural vibration" Academic press, 1985.

[2] 이군희, 강연준, "잠수함 프로펠러의 명음에 관한 연구", 한국소음진동공학회 1999년도 추계학술대회 논문집, pp. 748-756.

[3] A. F. Charwat, J. N. Roos, F. C. Dewey, and J. A. Hitz, "An Investigation of Separated Flows. Part I. The Pressure Field," *Journal of the Aerospace Sciences*, Vol. 28, June 1961, pp. 457-470.

[4] 유기완, 이준신, 김범년, 김태룡, "전향계단에서 모따기 각도 변화에 따른 와류 유동소음 연구", 한국소음진동공학회 1999년도 추계학술대회 논문집, pp. 674-690.

[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] Komae Research Laboratory, Report No. T86028, CRIEPI, JAPAN, 1986.

[7] 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.