

Predicting Formula Development of Audible Noise on a 765kV AC Transmission Line(I)

李 東 一* · 具 滋 允**
(Dong Il Lee · Ja Yoon Koo)

Abstract - Audible noise from corona discharge had been identified as one of the most important factors in the design of conductor configurations for high-voltage transmission lines, 500kV and above. Therefore this paper describes audible noise characteristics of 6 X 480mm² conductor bundle in KEPRI 765kV Test Line and Corona Cage. Prediction formula for audible(corona) noise on a 765kV Transmission Line was developed using this results.

Key Words : Corona(Audible) Noise, Corona, Transmission Line(T/L)

1. 서 론

송전전압이 500kV 이상이 되면 강우시 도체표면 전계강도가 주변공기의 코로나 臨界電界値 이상이 되어 도체 주변공간의 空氣絶緣이 局部的으로 파괴되는 코로나현상이 발생한다. 이로 인하여 빛, 가청소음, 라디오장애, TV장애, 도체진동 그리고 오존 등이 발생하며, 또한 이와 같은 발생원의 에너지는 공급되는 전력의 손실로서 코로나손이 된다.

따라서 765kV 송전선의 도체선정에서는 단순한 電流容量뿐만 아니라 이러한 코로나에 의한 電氣環境障害를 만족하는 도체를 選定하여야 한다. 이러한 환경장애요소들의 정확한 해석과 대책강구가 부족할 시는 送電線路 건설후 선로 인근 주민의 불만을 惹起시키므로 이에 대한 대책으로 도체의 表面電界強度를 낮추기 위하여 굵은 도체나 復導體 方式를 채택하여 검토한다. 이러한 검토는 송전선로가 건설되는 지역의 기압, 강우강도, 풍속 등의 기후조건과 채용하는 전압방식, 송전철탑 구성등을 고려하기 때문에 765kV를 운전하고 있는 미국의 BPA, AEP 그리고 캐나다 전력회사들은 모두 수평배열방식 송전선로로 구성된 경우이기 때문에, 우리 나라 765kV와 같이 다른 나라에서 사용한 예가 없는 765kV 垂直配列 2回線 송전방식에 적용하여 외국 예측식을 이용한 이론적 방법만으로 검토하는 것이 한계가 있어 일반적으로 單相 模擬 試驗線路인 코로나 케이지(Corona Cage)와 實規模 實證試驗線路를 이용하여 연구를 하여 설계를 한다.

따라서 본 논문에서는 실규모 시험선로와 코로나 케이지 시험결과를 이용하여 추후 건설하려는 송전선로에 대한 코로나소음을 실제로 측정하지 않고 예측계산 할 수 있는 실험적인 예측계산식을 우리 나라의 기후와 제반 기술조건에 맞도록 개발을 시도하였다.

2. 코로나소음 발생과 예측의 기본이론

코로나 발생에 따른 송전선의 可聽騒音(Audible Noise)특성은 주로 소음의 發生과 그 발생소음의 傳播특성으로 대별할 수 있다[1].

그림1과 같은 송전선로에서 코로나 발생원이 선로를 따라 A[W/m]의 음향파워(Noise Power)가 균등하게 분포되어 있다고 가정할 때 주어진 소음원에서 음향세기(Acoustic Power Intensity)를 계산하는 일반식은

$$J = \frac{A}{S} \tag{1}$$

여기서,

J = 음향세기[W/m²]

A = 소음원에서 발생하는 음향파워[W]

S = 소음원을 둘러싼 표면적[m²]

이 소음원 가까이 진파에 방해되는 어떤 것을 가지지 않는 점음원이라 가정하면 위의 식(1)의 S는 구의 표면적이 된다. 따라서 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$J = \frac{Q}{4\pi R^2} \tag{2}$$

여기서, R = 음원으로부터 측정점까지 방사거리 [m]

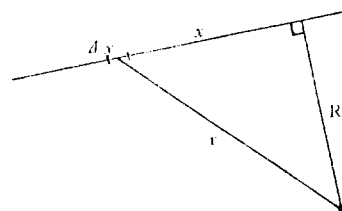


그림 1 대지로부터 멀리 이격된 단도체의 간략화한 소음원과 특성 기하학적 배치도

Fig. 1 Geometry for a simple case of single conductor far from ground

*正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

**正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1995年 11月 22日

最終完了 : 1996年 3月 19日

선음원은 각각의 점음원이 모여진 것이라고 가정하면, 선음원의 음향 세기는 각 점음원의 음향세기의 합이 된다. 따라서 선음원에 대한 식(2)는 대지의 반사특성을 감안한다면 식(3)과 같이된다.

$$J = \int \frac{A dx}{4\pi(R^2 + x^2)} + k \int \frac{A dx}{4\pi(z^2 + x^2)} \quad (3)$$

여기서,

- A = 도체단위 길이당 발생된 음향파워[W/m]
- R = 음원으로부터 측정점까지 방사거리 [m]
- Z = 측정점부터 선로의 영상까지 거리 [m]
- X = 선로도체의 음원 발생거리
- K = 반사계수

식(3)에서 측정점이 대지에 매우 가깝다고 생각하면 (예를 들어 R = Z)

$$J = \frac{A(K+1)}{2\pi R} \tan^{-1} \frac{L}{2R} \quad (4)$$

여기서, L = 선로의 길이 [m]

측정 마이크로폰에 감지되는 음압 레벨은 식(5)와 같이 규정된다.

$$SPL = \sqrt{CJ} \delta \quad (5)$$

여기서,

- SPL = 음압도 [Pa]
- δ = 공기밀도 [kg/m³], 대기에서 $\delta = 1.205$ [kg/m³]
- C = 공기 중에서 음의 전파속도 [m/s]
- 대기에서 C = 344 [m/s]

식(4)를 식(5)에 대입하면

$$SPL = \left\{ \frac{A \delta C(K+1)}{2\pi R} \tan^{-1} \frac{L}{2R} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

식(6)을 가청소음의 일반적인 단위인 dB로 표현하기 위해 dB로 환산시 기준치인 20 μ pa를 분모로 취하고 대지를 아주 우수한 흡음특성 매체로 간주하여 K = 0 으로 취해 dB로 표현해 보면 식(7)과 같이된다.

$$SPL_{dB} = 10 \log \left\{ \frac{SPL}{20 \mu pa} \right\}^2 \quad \text{그리고} \quad A_{dB} = 10 \log \frac{A}{1pw/m} \quad (7)$$

$$SPL_{dB} = A_{dB} - 10 \log R + 10 \log \left(\tan^{-1} \frac{L}{2R} \right) - 7.8 \quad (8)$$

송전선로와 같이 거의 무한선로에서는 $L/2R \rightarrow \infty$ 그리고 $\tan^{-1} \infty = \pi/2$ 가 되고 따라서 식(8)은 식(9)와 같이된다.

$$SPL_{dB} = A_{dB} - 10 \log R - 5.8 \quad (9)$$

3. 코로나소음 예측계산

이러한 코로나에 의한 가청소음의 발생은 주로 도체표면 전위경도에 의해 발생하고 음향법칙에 의해 전파한다. 이러한 가청

소음 계산은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며 ① 어떤 특별한 형태의 선로에 적용되는 방식(예를 들어 2회선, 수직배열 등) ② 다른 형태의 선로에도 공통적으로 적용할 수 있는 방식이 있다[2].

본 논문에서는 765kV 수직배열 2회선 선로 시험선로와 코로나 케이지 시험결과로 얻어진 자료를 이용하여 ①의 경우에 대한 예측치 계산식을 식(10)과 같은 형태로 유도하였다.

$$SPL = AN_0 + k_1 f_1(E) + k_2 f_2(n) + k_3 f_3(d) + k_4 f_4(R) + k \quad (10)$$

여기서,

- SPL : 예측계산 코로나소음크기[dB(A)]
- AN₀ : 기본이 되는 참고 측정치
- E : 도체표면 전위경도
- n : 각 상의 소도체 수
- d : 소도체 직경
- R : 측정점으로부터 선로의 소음원까지 거리
- k₁~k : 상수

예측식 개발에 사용된 가청소음 DATA

고창 765kV 실증시험선로, 단상모의 시험장치(Corona Cage)를 이용하여 적용계수들을 구했으며, 실규모 실증시험선로에서는 몇 년간 장시간의 통계치를, 단상모의 시험장치인 코로나 케이지를 이용해서는 여러 번의 평균치를 이용하였다..

표 1 및 표 2는 본 논문에서 예측식 개발에 사용된 송전선의 가청소음 측정자료를 나타낸 것이다[3, 4].

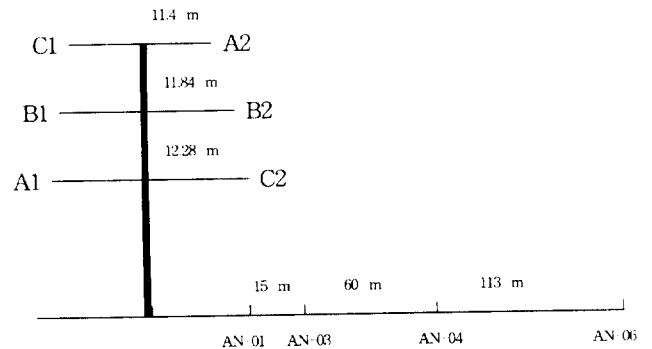


그림 2 765kV 수직배열2회선 시험선로 전선 및 측정점 배치도

Fig. 2 Configuration of 765kV double circuit transmission line and measuring points

3.1 도체표면 전위경도 영향

도체표면 전위경도는 가청소음 발생에 영향이 크기 때문에 예측계산식에서 주요소가 되고 이것의 계산방식은 여러 방식이 있지만 Mangoldt가 개발한 식이 정확하여 예측계산식에 잘 맞기 때문에 이 계산 방식을 사용하였다.

표 2의 코로나 케이지를 이용한 최대도체표면 전위경도 변환에 따른 소음변화를 이용하였으며, 810mm²의 6도체 경우의 분석시 불량데이터가 있어 14 ~ 17[kV/cm] 데이터만 이용하였다.

표 1 코로나 가청소음 측정 데이터

Table 1 Measurement data of audible noise

線路名	導體數	導體直徑 [mm]	線間電壓 [kV]	相座標 [x/y.m]						相數	導體表面電位傾度[Gmax, kVrms/cm]				소음치	
				A1	B1	C1	A2	B2	C2		A1	B1	C1	平均	最外相으로부터 測定點까지 거리 [m]	L50 (Rain) [dB(A)]
고창765kV 시험선로	6	29.61	765	12.28 /24.5	11.84 /40.5	11.4 /56.5	-11.4 /56.5	-11.84 /40.5	-12.28 /24.5	6	15.19	15.05	15.17	15.13	15	48.8
코로나 케이지	6	29.61	"	"	"	"	"	"	"	6	15.19	15.05	15.17	15.13	"	44.9
"	6	2.85	"	"	"	"	"	"	"	6	15.44	15.31	15.05	15.27	"	48.2
"	4	3.72	"	"	"	"	"	"	"	6	16.23	16.04	16.28	16.18	"	58.3
"	4	3.84	"	"	"	"	"	"	"	6	15.83	15.64	15.88	15.78	"	56.8
"	6	3.84	"	"	"	"	"	"	"	6	12.15	12.06	12.2	12.17	"	43.2

표 2 시험도체 방식별 강우시 가청소음 출력음압레벨 (P1)

Table 2 Audible noise SPL of test conductors in rainy weather

No.	소도체수	선종 [mm] 직경 [cm]	강우최대도체표면전위경도Gmax[kV/cm]					
			14	15	16	17	18	19
1	6	410 (2.85)	56.4	56.7	59.1	65.2	68.6	70.8
2	6	480 (2.961)	54.7	54.8	58.8	66.5	70.5	72.7
3	4	765 (3.72)	57.4	61.5	67.0	71.7	74.5	76.1
4	4	810 (3.84)	55.7	61.5	67.3	71.1	73.9	75.5
5	6	810 (3.84)	54.6	62.6	70.9	-	-	-

3.2 소도체수변화에 따른 영향

이것의 검토는 동일도체 굵기, 동일(전위경도) 조건에서 소도체수만 변경시켰을 경우에 소음 변화영향에 해당되므로 표 2에서 직경 38.4mm 인 810 mm²도체의 소도체 4와 6인경우가 해당 된다.

3.3 도체직경변화에 따른 영향

이것의 영향은 전위경도나 소도체수 변화에 의한 영향만큼 크지 않으며, 동일 소도체수, 동일전위경도 조건에서 도체직경이 다른 경우인 6도체로 직경이 28.5mm, 29.61mm, 그리고 38.4 mm인 세 가지 측정결과를 이용하였다.

3.4 거리감쇄율

코로나소음은 송전선에서 발생한 선음원으로 거리가 멀어짐에 따라 공기중의 흡수, 굴절, 차폐, 산란, 그리고 대지영향 등으로 저감된다. 그림2와 같이 765kV 시험선로에서 선로로부터 직각방향으로 이격시켜 설치한 4개의 마이크로폰중에서 배경잡

음 측정용 이용하여 장기측정한 표3을 이용하여 구해보면 다음과 같다.

표 3 거리감쇄에 따른 소음측정치[4]

Table 3 Lateral profile of audible noise

측정마이크로폰	인가전압 [kV]	측정거리 [m]	측정치	
			강우시	방사거리
AN-01	765	선로직하	49.2	44
AN-03	"	직하에서 15m이격	48.8	50
AN-04	"	" 60 "	44.7	84
AN-06	"	" 188 "	42.2	195

$$k_4 \log \frac{R}{R_0} = L_R - L_{R0}$$

$$k_{11} \log \frac{50}{44} = 48.8 - 49.2 \quad \therefore k_{11} = -7.2$$

$$k_{12} \log \frac{84}{50} = 44.7 - 48.8 \quad \therefore k_{12} = -18.2$$

$$k_{13} \log \frac{195}{84} = 49.2 - 44.7 \quad \therefore k_{13} = -6.8$$

$$\text{강우시 거리감쇄율 계수} = -(7.2 + 18.2 + 6.8)/3 = -10.7 \quad (11)$$

4. 개발에 측식의 시험선로 실측치와의 비교검증

도체표면 전계강도, 소도체 수, 소도체 직경변화를 코로나소음에 대한 변수로 놓고, 범용적으로 사용되고 있는 Mathematica 프로그램을 이용하여 최소 자승법으로 구하여 보면 식 (12)과 같은 결과를 구할수 있다.

$$\text{SPL} = -141.216 + 1.07124 \ln [n] + 20.0465 \ln [d] + 6344 \ln [E] \quad (12)$$

표 4 코로나 가청소음 측정점이 최외상 15[m]인 경우의 예측식 결과치와 시험선로 장기 실측값의 비교

Table 4 Comparison between predicting formula output and measuring data

상 명	도체표면 전계강도 [kV/cm]	거리[m]	인가 전압이 765kV일 때의 상별 발생 가청소음량[dB]	인가 전압이 800kV일 때의 상별 발생 가청소음량[dB]
PH A-1	15.19	28.727	42.70	45.59
PH B-1	15.05	43.343	40.19	43.08
PH C-1	15.17	58.689	39.29	42.19
PH A-2	15.17	68.472	38.67	41.56
PH B-2	15.05	56.281	38.98	41.87
PH C-2	15.19	46.464	40.38	43.28
예측 계산 총 발생 가청소음량			48.1	50.9
실측 선로 측정 가청소음량			48.8	51.6

식(12)에 거리감쇄율 항 식(11)을 적용하면, 식(13)이 된다.

$$SPL = -141.216 + 1.07124 \ln[n] + 20.0465 \ln[d] + 64.6344 \ln[E] - 10.7 \log R \quad (13)$$

이상의 표 4의 결과와 같이 개발된 예측 계산식이 정격전압과 최대전압에서 실측치와 약 0.7 [dB] 오차를 갖고 있어 매우 정확함을 알았다.

5. 결 론

본 연구에서는 격상을 앞두고 있는 765kV 송전선로의 설계에서 도체선정시 고려하여야할 코로나에 의한 전기환경장해 요소 중 가장 중요한 가청소음의 발생특성을 분석하였다.

송전선로를 설계시 송전선로의 구조, 와 도체방식 그리고 선로로부터 이격거리에 따라 송전선 주위에서 소음을 예측계산하는 식을 유도하는 것은 많은 시험자료와 경험을 필요로 한다.

이런 관점에서 본 논문에서는 코로나 가청소음의 발생함수로 최대도체표면전위경도, 도체직경, 소도체수 그리고 거리감쇄율을 이용하여 식(13)과 같은 비교적 정확한 765kV 송전선로의 코로나소음의 예측식을 구하였다.

그러나 보다 정확하고 광범위하게 적용할수 있는 예측식의 개발을 위하여 충분한 시험과 계속적인 검토를 지속하고자 한다.

본 논문 작성에 공동측정과 조언을 주신 전력연구원 김정부 박사님, 신구용 연구원님, 전기연구소 양광호, 안희성 연구원님 그리고 순천향대 민석원 교수님께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] V.L.Chartier : Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines : IEEE /PES Jan. 1980.
- [2] Transmission Line Reference Book, EPRI, .P. 274-301. 1982.
- [3] 김정부의 8인 : 초고압 송전에 관한 연구V, 한전전력연구원 보고서 1989.
- [4] 김정부의 8인 : 초고압 송전에 관한 II 단계연구III, 한전전력연구원 보고서 1994.

그림 3 예측식과 케이지 데이터에 의한 코로나 가청소음 3차 원도 (4 복도체경우)

Fig. 3 Three dimension diagram of audible noise formula using corona cage data (4 subconductor case)

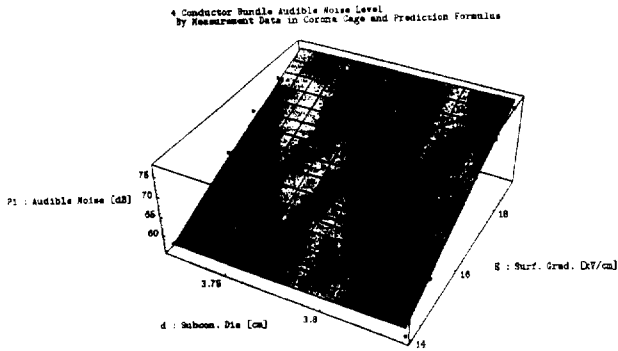


그림 4 예측식과 케이지 데이터에 의한 코로나 가청소음 3차 원도 (6 복도체경우)

Fig. 4 Three dimension diagram of audible noise formula using corona cage data (6 subconductor case)

