

유전프로그래밍에 의한 초고압 송전선로 환경설계용 코로나 소음 예측계산식 개발

論 文
50A-5-4

Development of Audible Noise Prediction Formulas Applied to HVAC Transmission Lines Design by Using Genetic Programming

梁光鎬* · 黃期鉉** · 朴俊灝*** · 朴鍾根§
(Kwang-Ho Yang · Gi-Hyun Hwang · June-Ho Park · Jong-Keun Park)

Abstract - Audible noise (AN) produced by corona discharges from high voltage transmission lines is one of the more important considerations in line design. Therefore, line designers must pre-determine the AN using prediction formulas. This paper presents the results of applying evolutionary computation techniques using AN data from lines throughout the world to develop new, highly accurate formulas for predicting the A-weighted AN during heavy rain and stable rain from overhead ac lines. Calculated ANs using these new formulas and existing formulas are compared with measured data.

Key Words: T/L Design, Corona AN Prediction, AN Database, Evolutionary Computations, Genetic Programming

1. 서 론

코로나에 의해 발생하는 가청소음(AN; audible noise)장해는 초고압 교류 및 직류 송전선로 설계시의 여러 설계조건 중의 하나이다. 따라서 선로 설계자들이 적합한 도체방식을 선정하는데 도움을 주는 코로나 소음 계산식들이 이미 제안되어 있다[1]. 그러나 기존 계산식들의 대부분은 제한된 적용 조건, 큰 예측오차 등으로 인해 사용상 제약을 받아왔다.

코로나 소음 계산식 개발을 위해서는 다량의 실측 데이터가 필요하며, 이 데이터는 단상 코로나 케이지(corona cage)나 실규모 시험선로(test line) 또는 상용선로에서 얻는다. 본 논문에서는 전 세계의 각종 선로로부터 장기간 동안 측정된 데이터를 수집하여 구축한 코로나 소음 Database를 사용했다. 이 중 국내 데이터는 코로나 케이지(6x6x20m)와 시험선로(700m, 3경간)에서 1988년부터 1998년까지 약 10년간 획득한 것이다.

실측 데이터 분석에는 통계적인 방법이 사용되었고, 그 결과 A보정(A-weighted) 소음치, 누적확률분포, L 소음치, 주파수 스펙트럼, 거리감쇠특성(lateral profile) 등을 얻을 수 있었다[2-5]. 이 중에 L5%, L50% 통계치와 송전선로 파라미터(G, N, d, D)들이 3절에서와 같이 새로운 코로나 소음 계산식을 구하기 위해서 진화연산(evolutionary computations)의 한 방법인 유전프로그래밍(GP, genetic programming)에 적용되었다. 예측계산식의 성능평가를 위해서는 본 논문에서의

제안식과 기존의 계산식들 모두를 6개 상용선로에 적용하여 예측의 정도를 검증함으로써, 송전선로 설계와 코로나 소음 환경영향평가에 유용한 4개의 새로운 예측계산식을 제안하였다.

2. 일반적인 코로나 소음 예측이론

2.1 음의 전파와 감쇠

송전선로의 각 상의 음향파워레벨(PWL_i)은 코로나 소음 계산에 필요하다. 이것들은 3상 소음치(SLT_{mea})를 이용하면 구할 수 있다. 그러나 음향파워레벨들을 구하는데는 다음의 3요소가 고려되어야 한다.

- 1) PWL_i 와 SLT_{mea} 간의 상관관계
- 2) 소음 감쇠에서의 공기흡수 영향
- 3) 각 상과 계산점 간의 방사거리(radial distance)

2.2 선음원에서의 PWL_i 계산식 유도

음향파워레벨을 계산하기 위해서는 측정치를 음향파워로 환산하는 환산식이 필요하다. 환산식의 유도과정은 다음과 같다. 임의 선음원의 일반적인 파워밀도 계산식은 식 (1)과 같다.

$$J = \frac{A}{S} = \frac{A}{4\pi R^2} \quad (1)$$

- 단, J : 음향파워밀도 (W/m^2)
 A : 음향파워 (W)
 S : 소음원을 둘러싼 표면적 (m^2)
 R : 음원-계산점 간의 방사거리 (m)

* 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博
 ** 正會員 : 釜山大 컴퓨터 및 情報通信研究所 基金教授
 *** 正會員 : 釜山大 電子電氣工學部 教授 · 工博
 § 正會員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2001年 2月 20日
 最終完了 : 2001年 4月 6日

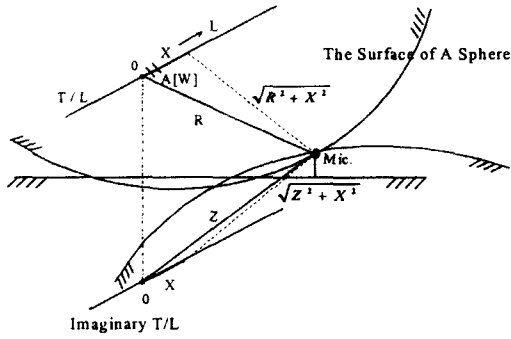


그림 1. 각 상으로부터 발생되는 음압 계산도

Fig. 1. Calculation of sound pressure levels from each phase

그림 1에서 선음원이 독립적인 각 점음원의 집합이라면, 선음원의 음향파워밀도 J 는 점음원들의 파워 에너지 각각의 합이 될 것이다. 따라서 선음원에 대한 식 (1)은 식 (2)로 표현된다.

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

- 단, A : 전선 단위길이 당 음향파워 (W/m)
- x : 선로 상 소음 발생 구간 (m)
- Z : 계산점에서 영상선로까지의 거리 (m)
- K : 반사계수 (1 또는 0)

만약 측정점이 지면에 근접($R=Z$)해 있다고 가정하면 식 (2)는 식 (3)과 같이 된다.

$$J = \frac{A(K+1)}{2\pi R} \tan^{-1} \frac{L}{2R} \quad (3)$$

단, L : 송전선로의 길이 (m)

따라서, 각 상의 실측 음압레벨(SPL_i)은 식 (4)로 정의되고, 식 (3)을 식 (4)에 대입하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$SPL_i = \sqrt{CJ\delta} \quad (4)$$

$$= \left[\frac{A\delta C(K+1)}{2\pi R} \tan^{-1} \frac{L}{2R} \right]^{1/2} \quad (5)$$

- 단, δ : 공기밀도 (1.205 kg/m³)
- C : 음속 (상온 20 °C에서 344 m/s)

식 (5)에 $K=0, L \gg 2R$ 의 조건을 적용하고 $dB_{20\mu Pa}$ 단위로 변환하면, 무한장 송전선로에 대한 식 (6)이 얻어진다.

$$SPL_i(dB) = A(dB) - 11.4 \log R + 10 \log \left(\tan^{-1} \frac{L}{2R} \right) - 7.8 = PWL_i - 11.4 \log R - 5.8 \quad (6)$$

$$SLT_{cal.} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^P 10^{\frac{SPL_i}{10}} \right] \quad (7)$$

단, P : 相數, PWL_i : 각상의 음향파워레벨 (dBA)

따라서, 송전선로의 모든 상으로부터 발생되는 코로나 소음 합성 계산치 $SLT_{cal.}$ 은 식 (7)로부터 구할 수 있다. 그러나 이 3상 계산치는 SLT_{mea} 에 비해 수 dB 높기 때문에 정확한 계산치 $SLT'_{cal.}$ 을 얻기 위해서는 각 상의 음향파워레벨 PWL_i 들을 이 차이만큼 보정해 주어야 한다[6].

3. 기 제안된 외국의 예측계산식

3.1 실험식의 일반형

초고압 송전선로 코로나 소음 계산식은 2가지 일반형이 있다. 즉, 특별한 선로형상(line geometry)이나 특정 송전전압 경우만 적용이 가능하며 3상 합성소음($SLT_{cal,3P}$)이 계산되는 3상식(Type-1)과 적용범위가 광범위하고 각상의 코로나 소음 발생량이 계산되는 단상식(Type-2)이 있다. 이러한 계산식 개발을 위해서는 상용선로 또는 시험선로로부터의 3상 실측치와 단상 시험선로 또는 코로나 케이지(corona cage)에서 얻은 단상 실측치가 필요하다.

표 1. 국외의 기존 교류 코로나 소음 계산식 ($N \geq 3$)
Table 1. The existing AC Audible Noise formulas ($N \geq 3$)

제안 기관명	전위경도(G) $k_{f1}(G)$	소도계수(N) $k_{f2}(N)$	전선직경(d) $k_{f3}(d)$	방사거리(D) $k_{f4}(D)$	상수, k_0	Noise Measure (강우시)	Type No.
BPA	120 log G	26.4 log N	55 log d	-11.4 log D	-128.4	L_{50}	2
EdF	-	15 log N	4.5	-10 log D	G 에 의존	HR	2
ENEL	85 log G	18 log N	45 log d	-10 log D	-71	HR	2
FGH	2	18 log N	45 log d	-10 log D	-0.3	Max	2
GE	-665/ G	20 log N	44 log d	-10 log D	-	L_5, L_{50}	2
IREQ	72 log G	22.7 log N	45.8 log d	-11.4 log D	-57.6	Max	2
CRIEPI	-665/ G	-	-	-10 log D	N 과 d 에 의존	HR	2
Westinghouse	120 log G	10 log N	60 log d	-11.4 log D	-	-	-
AEP	108 log G	10 log N	102.5 log($d/2.54$)	-	-94.5	Avg	1
Ontario Hydro	100 log G	-	40 log d	-10 log D	-77.2	HR	1

전 세계의 주요 교류 송전선로 코로나 소음 계산식들을 표 1에 정리했다. 식 (8)은 AN 계산식의 일반형이다[1].

$$SLT'_{cal} = k_{f1}(G) + k_{f2}(N) + k_{f3}(d) + k_{f4}(D) + k_0 \quad (8)$$

3.2 기호 설명

- G : 최대 도체표면 전위경도, kV/cm
- N : 각상의 소도체 수
- d : 소도체 직경, cm
- D : 전선과 계산점간의 방사거리, m
- PWL_i : 각상의 음향파워레벨, dBA
- SLT'_{cal} : 3상(또는 단상) 코로나 소음 계산치, dBA
- SLT_{mea} : 코로나 소음 실측치, dBA
- SLT_{cal} : 송전선로 3상 합성 음압, dBA
- SPL_i : 합성소음에 대한 각상의 기여 음압레벨
- $f_1(G), f_2(N), f_3(d), f_4(D)$: 파라미터 G, N, d, D의 함수
- $k_0 \sim k_4$: 각 함수의 계수 및 상수항
- $L_{5\%}, L_{50\%}$: 연중 강우시간의 5%와 50%를 초과하는 소음치, dBA

4. GP 적용에 의한 예측식 개발

4.1 진화연산

생태계의 진화를 모의한 확률적인 최적화 탐색 알고리즘인 진화연산(evolutionary computation)은 유전알고리즘, 진화 전략, 진화 프로그래밍, 유전 프로그래밍 등의 기법으로 대별된다[7]. 이들 알고리즘들의 유사점은 주어진 최적화 문제에 대해 하나의 해가 아닌 해집단(population)으로 탐색하며, 해집단내에서 더 좋은 적합도(fitness)를 가지는 해들을 이용하여 새로운 해집단을 생성한다는 점이다.

4.2 유전프로그래밍 적용 및 결과

GP(genetic programming)는 유전자형의 개체로써 목구조(tree)로 구조화된 프로그램을 사용한다. 주어진 문제 영역에 적합한 함수(functions)와 터미널(terminals)로 구성되며, 임의 생성된 프로그램(S-expressions)들을 초기 해집단으로 사용한다. 함수에는 4칙 산술연산자(+, -, ×, %), 수학함수(SIN, COS, EXP, LOG 등), 논리함수(AND, OR, NOT 등), 조건 연산자 등이 사용된다. 터미널들은 시스템의 입력, 센서, 변수 및 상수 등이 될 수 있다. 해집단에서의 각 개체 프로그램은 문제의 환경에서 얼마나 잘 수행하는가로 평가된다. 이 척도를 적합도(fitness measure)라 한다[7].

본 논문에서는 식 (8)의 기존 일반형과는 다른 새로운 형태의 코로나 소음 예측식(prediction formulas)을 찾기 위해 문제에 적합한 터미널 집합과 함수 집합을 선택했다. GP의 탐색절차는 다음과 같다.

1) 초기 해집단 생성: 단계 I는 터미널 집합 T 를 정하는 것이다. 식 (9)와 같이 T 는 송전선로 파라미터인 4개 변수와 1개의 특수한 임의 단명 상수(ephemeral random constant)

터미널 R 로 구성했다.

$$T = \{ G, N, d, D, R \} \quad (9)$$

단계 II는 주어진 AN 실측 데이터에 적합하려고 시도하는 S 수식들을 생성하는데 사용되는 함수집합 F 를 정하는 것이다. F 는 식 (10)과 같이 문제에 적합한 5개의 함수로 구성했다.

$$F = \{ +, -, \times, \%, \log \} \quad (10)$$

2) 평가: 단계 III에서는 각 S 수식들이 문제의 환경에 얼마나 잘 적용하고 있는지를 평가한다. 평가의 척도로써 식 (11)의 계산치(SLT'_{cal})와 기대치(SLT_{mea})간 차이의 절대치 합으로 표현되는 적합도 함수(fitness function)를 사용하였다.

$$Fitness = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^q |error_i|} \quad (11)$$

단, $error_i = SLT_{mea}(desired) - SLT'_{cal}(calculated)$
 $q = AN$ 데이터의 개수

이상의 유전프로그래밍 연산에 의한 코로나 소음 예측계산식 개발과정에 대한 흐름도는 참고문헌 [4]와 같고, 표 2는 본 연산에 사용된 시뮬레이션 계수들을 종합한 것이다.

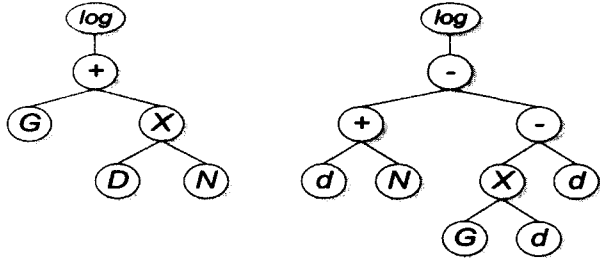
표 2. GP 연산에 사용된 파라미터

Table 2. GP parameters

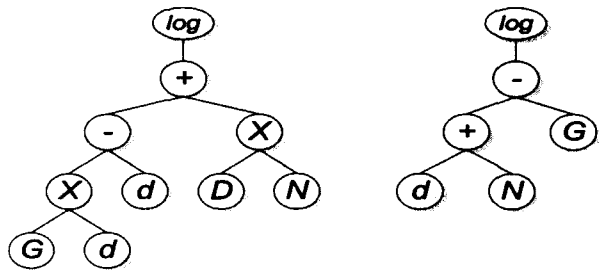
	유전프로그래밍(GP)
세대수	2000
해집단 크기	1000
선택방법	토너먼트
교배확률 (P_c)	0.70
돌연변이 확률 (P_m)	0.01
교환 확률	0.02
短命의 임의 상수 (R)	-127 ~ +128
목구조의 길이	16개 함수

3) GP 연산자(operators): 각 프로그램들의 적합도에 따라서 우수한 개체를 선택(selecting)하고 다음 세대로 복제(reproduction)함으로써 자손 해집단을 생성하는 유전적 연산 과정이다. 복제연산은 한 개 부모 프로그램을 복제하여 한 개 자손프로그램을 만드는데 이때는 크기와 모양이 변하지 않는다. 본 연산에서 개체 선택방법은 선택확률이 적합도의 크기에 비례하는 토너먼트 선택방법(tournament selection)을 사용했다. 본 방법은 적합도가 낮은 해집단도 경쟁상태에 따라서 다음 세대에 복제될 확률이 높기 때문에 해집단의 다양성(diversity)을 보장하는 장점을 가지고 있다. 자손프로그램은 유전알고리즘에서의 스트링과는 달리 그림 2와 같이 보다 복잡한 구조의 유전자형 목구조(tree)로 표현된다. 다음 연산자인 교배(crossover)는 2개 부모 프로그램에서 토너먼트 방법으로 교배점을 임의로 선택하고 교

배연산을 하여 자손프로그램 2개를 만드는 과정이다. 그림 2의 교배연산 예에서, 교배점 이하의 교배 조각(fragment)을 상호 동일 지점으로 교환한 결과 프로그램의 구조가 변하고 따라서 S 수식이 완전히 달라지는 것을 볼 수 있다.



부모-1 = $\log(G + DN)$ 부모-2 = $\log(2d + N - Gd)$
(a) 2개의 부모 프로그램



자손-1 = $\log(Gd - d + DN)$ 자손-2 = $\log(d + N - G)$
(b) 교배 후 생성된 2개 자손 프로그램

그림 2. 유전프로그래밍의 교배연산 예시

Fig. 2. The crossover operation in Genetic Programming

또 다른 연산자인 돌연변이(mutation)에 의해서도 개체 프로그램의 구조는 변할 수 있다. 이상의 3가지 유전적 연산은 수렴조건을 만족할 때까지 여러 세대동안 반복된다.

4) **엘리티즘(elitism)**: 각 세대마다 엘리티즘을 적용하여 각 세대에서 적합도가 가장 뛰어난 단 한 개의 프로그램을 교배와 돌연변이 및 교환과정을 수행하지 않고 다음 세대에

그대로 복제하는 엘리티즘 방법을 사용했다. 엘리티즘을 적용하는 이유는 교배와 돌연변이에 의하여 생성된 우수한 해 집단의 형질이 변경되는 것을 방지하기 위해서이다.

5) **수렴조건**: 수렴조건은 식 (11)에서 실측치와 계산치 간의 절대오차의 평균치가 1.0 dBA 이하가 되면 종료하는 것으로 했다.

6) **GP에 의한 코로나 소음 예측계산식 도출**: GP에 의한 AN 계산식은 식 (8)과 같은 일반형이 아니고 보다 복잡한 형태를 갖는다. 이는 GP가 식 (9), (10)의 터미널과 함수 집합에서 최상의 조합(best combination)을 취하기 때문이다.

표 A1의 24개 실측치를 이용해서 구한 Type-1 3상 계산식은 표 3의 식 (12), (13)과 같다. 또한 식 (6)을 24개 실측치에 적용하여 구한 90개 단상치를 이용해서 구한 Type-2 단상 계산식은 표 4의 식 (14), (15)와 같다. 특히, 소도체 수 N에 따라 변하는 전선표면전계(G) 및 코로나의 물리적 특성들을 고려하여 예측오차를 최소화하기 위해서 각 식의 각 항의 계수 및 상수를 N과 상수 P에 따라서 정했다.

5. 예측의 정확도 검증결과

5.1 검증방법

표 3, 4의 4개 계산식들과 기존 식들의 예측 정도를 확인, 비교하기 위해서 그림 3과 같은 형상을 모두 포함하는 표 5의 6개 교류 송전선로에 대해 각 식의 계산치(SLT_{cal.})를 구

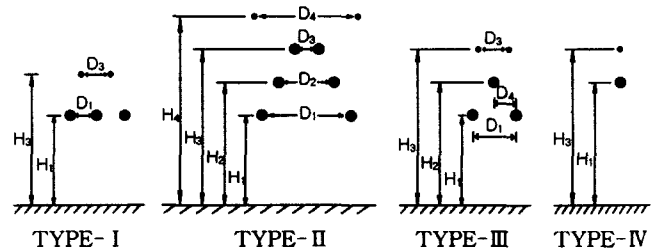


그림 3. 표 5의 가공 교류 송전선로들의 형상

Fig. 3. AC line configurations referenced by Table 5

표 3. GP에 의한 강우 및 경우시의 코로나 소음 3상 예측계산식

Table 3. Type 1(3-phase) L5 and L50 formulas by GP

P	N	SLT _{cal.} 식
3, 6	<3	$K_1G \cdot \log G + K_2G \cdot \log d + K_3G \cdot \log D + K_4 + K_5$
	≥3	$K_1 \cdot \log N + K_2 \cdot \log (G/d - N) + K_3 + K_4$
1		$K_1d \cdot \log G + K_2d \cdot \log N + K_3d \cdot \log D + K_4 + K_5$

	P	N	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
L ₅ GP3PL5 (12)	3, 6	<3	5.505	3.736	-1.042	-4.268 G	3.12
		≥3	0.999 G	-0.466	2.044 G + 4.182 d - 1.472 $\frac{N+D}{Nd}$	0.706	0
	1		-14.283	10.229	-3.432	0.941 Gd	16.195 d
L ₅₀ GP3PL50 (13)	3, 6	<3	3	4	-1	-1.462 G	0
		≥3	1.045 G	-1.711	2.064 G + 4.201 d - 2.002 $\frac{N+D}{Nd}$	-1.697	0
	1		-4	3	-3	Gd	6.82 d

(주) 단, if $\frac{G}{d} - N = 0$, then $\log(\frac{G}{d} - N) = 1$

표 4. GP에 의한 강우 및 경우시의 코로나 소음 단상 예측계산식
Table 4. Type 2(1-phase) L5 and L50 formulas by GP

SLT _{cal.} 식							
$K_1 \cdot \log G + K_2 \cdot \log N + K_3 \cdot \log d + K_4 \cdot \log K_5 + K_6$							
P=1, 3, 6	N	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
L ₅ GPIPL5 (14)	<3	179.23	0	58.71	-55.02	2 DG + 206 G	-3.81
	≥3	174.07	59.06	57.73	-57.89	2 DG + 97 GN + 206 G + DN	$0.9 \frac{GN}{D} + 3.7$
L ₅₀ GPIPL50 (15)	<3	181.00	0	59.11	-56.24	2 DG + 206 G	-4.49
	≥3	176.46	58.21	59.60	-58.00	2 DG + 97 GN + 206 G + DN	$0.94 \frac{GN}{D} - 3.02$

하고 이를 실측치(SLT_{mea.})와 비교하여 오차를 구했다. 표 6, 7에 각 경우의 실측치와 輕雨時(L50%), 強雨時(L5%) 각각의 계산치와의 절대오차를 나타냈다.

5.2 검증결과

표 6, 7의 검증결과에 의하면, 輕雨時 단상 코로나 소음 계산식(GPIPL50)인 식 (15)가 BPA식보다 0.4dBA 큰 것을 제외하고는 전반적으로 GP 적용으로 구한 계산식들이 해외의 기존 식들보다도 매우 우수하다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 4개 코로나 소음 계산식들의 적용 가능한 범위는 아래와 같다.

- 적용 가능 선로 형상 : 모든 종류의 교류 송전선로
- 계산치 척도 : 降雨時 L_{5%}치 및 L_{50%}치
- D (m) : 기준상으로부터 계산점까지의 방사거리
 - 수평1회선: 中間相
 - 삼각1회선 및 수직 2회선: 계산점에서 가까운 下相
- G (kV/cm) : 평균최대 도체표면전위경도
- 유효 적용범위
 - 선로전압: $235 \leq kV_{L-L} \leq 1690$
 - 相數: $P = 1, 3, 6$
 - 소도체 수: $1 \leq N \leq 16$
 - 소도체 직경: $2.35 \leq d \leq 6.35 \text{ cm}$
- 강우강도[5] : 輕雨 $\leq 2.5 \text{ mm/hr.}$
強雨 $\geq 7.7 \text{ mm/hr.}$

6. 결론

본 논문에서는 코로나 소음 실측 데이터베이스에 유전프로그래밍(GP)을 적용하여 교류 송전선로 코로나 소음 예측계산식을 개발, 제안하였으며, 주요 성과와 과제는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 송전선로 환경설계용 예측계산식 개발에 진화연산법을 적용한 것은 세계 초유의 시도이었으며, 개발결과에 따르면 본 진화연산법은 최상의 수식을 찾는데 매우 효과적인 탐색방법임을 알 수 있었다.
- (2) 터미널과 함수 집합에 의한 최상의 조합이라는 GP의 특성으로 인하여, 본 제안식들은 실측 데이터에 적합하며 일반형이 아닌 보다 복잡한 새로운 형태를 취하고, 또한 정교한 계수와 조정용 상수항을 취한다.
- (3) GPIPL50식을 제외한 본 논문에서의 제안식들은 기존의 해외의 계산식들보다도 우수했으며, 해외의 기존 단상식(Type-2)들 중에서는 미국의 BPA식이 가장 정확했다. 따라서 제안식(GPIPL50, GPIPL5)과 BPA식이 선로설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 선로설계 실무에서는 3상식보다 단상식이 보다 자주 사용되며 예측도 정확하다. 물론 단상식, 3상식의 선택적 사용은 주어진 문제에 따라서 결정되어야 할 것이다.
- (4) 본 논문의 또 하나 성과로써 1dBA 이하의 예측오차를 갖으며 적용범위가 넓고 기존 식들에서의 사용상 제약 조건들 대부분이 해소된 Type-1 3상식(GP3PL5, GP3PL50)을 개발했다는 것을 들 수 있다.
- (5) 향후 본 제안식의 성능개선을 위한 실험적 추가 접근과 인공지능기법의 지속적인 적용 연구가 기대된다.

표 5. 예측계산식 검증용 모델 송전선로의 파라미터

Table 5. Parameters of AC model lines used to verify all prediction formulas

모델 송전선로 No. 선로명 Type	선로 전압 (kV _{L-L})	도체 전위경도 (G, kV/cm)	상 수 (P)	Bundle Parameter		G.W. 직경 (cm)	상배치 (m)								계산 거리 (L m)	L _{5%} (SLT _{mea} , dBA)	L _{50%} (SLT _{mea} , dBA)	
				N	d(cm)		S(cm)	D1	D2	D3	D4	H1	H2	H3				H4
1 BPA2 I	525	17.10	3	2	4.07	45.7	-	10.4	-	-	-	12.2	-	-	-	32.3	58.2	54.5
2 Montana II	530	14.60	6	3	4.07	40.7	-	9.2	15.2	9.2	-	12.8	22.3	31.8	-	22.1	52.6	49.1
3 Unidentified I	765	17.53	3	4	3.52	45.7	-	13.7	-	-	-	15.2	-	-	-	32.1	60.8	55.3
4 KEPCO2 II	765	14.81	6	6	3.04	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	24.3	40.3	56.3	70.1	27.3	52.7	48.1
5 Unidentified III	1150	15.20	3	7	4.07	46.4	2.33	22.0	-	18.3	-	16.8	39.1	51.8	-	21.4	60.0	56.5
6 AEP-1P IV	1540	17.40	1	9	3.08	41.7	-	-	-	-	-	63.4	-	-	-	26.1	61.5	55.0

표 6. 모델 선로에 대한 제안식과 기존식의 輕雨時 코로나 소음 예측오차 비교

Table 6. Deviations and Absolute Errors between Calculated and Measured Levels for Models in Stable Rain

계산식 분류	계산식 종류	소음 척도 (dBA)	검증용 모델 송전선로 No.											절대오차의 평균치	
			# 1		# 2		# 3		# 4		# 5		# 6		
			N<3		N≥3		N≥3		N≥3		N≥3		N≥3		
1 (3-Phase)	AEP	L ₅₀	64.80	+10.30	-		62.64	+7.34	-		-		-		8.82
	GP3PL50	L ₅₀	54.13	-0.37	49.10	0.00	55.19	-0.11	48.33	+0.23	56.50	0.00	55.04	+0.04	0.13
2 (1-Phase)	BPA	L ₅₀	54.20	-0.30	48.36	-0.74	55.12	-0.18	48.23	+0.13	57.40	+0.90	-		0.45
	GE	L ₅₀	55.04	+0.54	49.94	+0.84	56.61	+1.31	4	+0.53	64.39	+7.89	57.22	+2.22	2.22
	GP1PL50	L ₅₀	53.88	-0.62	48.58	-0.52	55.73	+0.43	48.22	+0.12	58.05	+1.55	56.84	+1.84	0.85
실측치 (dBA)			54.5		49.1		55.3		48.1		56.5		55.0		-

표 7. 모델 선로에 대한 제안식과 기존식의 強雨時 코로나 소음 예측오차 비교

Table 7. Deviations and Absolute Errors between Calculated and Measured Levels for Models in Heavy Rain

계산식 분류	계산식 종류	소음 척도 (dBA)	검증용 모델 송전선로 No.											절대오차의 평균치	
			# 1		# 2		# 3		# 4		# 5		# 6		
			N<3		N≥3		N≥3		N≥3		N≥3		N≥3		
1 (3-Phase)	Ontario Hydro	HR	58.89	+0.69	-		58.03	-2.77	-		-		-		1.73
	GP3PL5	L ₅	58.28	+0.08	51.61	-0.99	58.03	-2.77	52.05	-0.65	59.69	-0.31	60.85	-0.65	0.91
2 (1-Phase)	BPA	L ₅	57.70	-0.50	51.86	-0.74	58.62	-2.18	51.73	-0.97	60.90	+0.90	59.88	-1.62	1.15
	EdF	HR	56.76	-1.44	57.24	+4.64	59.97	-0.83	55.11	+2.41	-		-		2.33
	ENEL	HR	56.69	-1.51	56.91	+4.31	60.35	-0.45	55.57	+2.87	62.11	+2.11	-		2.25
	GE	L ₅	61.17	+2.97	55.01	+2.41	59.38	-1.42	5	+1.92	66.77	+6.77	60.20	-1.30	2.80
	GP1PL5	L ₅	56.58	-1.62	52.14	-0.46	59.28	-1.52	52.26	-0.44	61.79	+1.79	60.69	-0.81	1.11
실측치 (dBA)			58.2		52.6		60.8		52.7		60.0		61.5		-

감사의 글

본 연구는 과학재단에서 시행한 특정연구 과제의 연구 결과임.(과제번호:#1999-2-302-007-3)

AC and DC lines", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-100, No. 1, Jan. 1981, pp. 121-129.
 [7] J. R. Koza, Genetic Programming, MIT, London, England, 1993, pp. 162-169.

참고 문헌

- [1] IEEE Committee Report, "A comparison of methods for calculating audible noise of high voltage transmission lines", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No. 10, Oct. 1982, pp. 4090-4099.
- [2] A report prepared by Korea Electric Power Research Institute, A Study on The Next EHV Transmission (V), KRC-84S-J11, Sep. 1989, pp. 121-136.
- [3] A report prepared by KEPRI, A Study on The Line Environment Interferences at EHV Transmission Test Line, KEPRI-90S-J01, Mar. 1996, pp. 25-33.
- [4] Kwang H. Yang, et al., "Audible noise performance of 6-Rail conductors on a 765-kV double circuit test line", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997, pp. 1343-1351.
- [5] IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines, IEEE Std. 539-1990, Feb. 1991, pp. 11- 13.
- [6] V. L. Chartier, R. D. Stearns, "Formulas for predicting audible noise From overhead high voltage

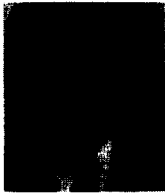
저 자 소 개



양 광 호 (梁 光 鎬)

1957년 11월 16일 생. 1981년 충북대 전기공학과 졸업. 1986년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경·송전연구그룹 책임연구원, Technical Leader (전력설비 환경친화 설계기술 분야). 1999년도 대한전기학회 및 2000년도 한국과학기술단체총연합회 우수논문상 수상. KIEE, IEEE 정회원.

Tel : 055-280-1322
 Email : khyang@keri.re.kr



황기현 (黃琪鉉)

1968년 3월 1일 생. 1994년 경성대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 부산대 일반대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신 연구소 기금교수

Tel : 051-510-3527, Fax : 051-513-0212

E-mail : hwanggh@pusan.ac.kr



박종근 (朴鍾根)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1983년~현재 서울대 전기공학부 교수

Tel : 02-880-5516, Fax : 02-883-0827

E-mail : parkjk@snu.ac.kr



박준호 (朴俊灝)

1955년 9월 17일 생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1978~1981년 충남대 공대 전기공학과 전임강사 및 조교수. 현재

부산대 공대 전자전기공학부 교수

Tel : 051-510-2370, Fax : 051-513-0212

E-mail : parkjh@pusan.ac.kr

부 록

표 A1. 송전선로 코로나 소음 3상 계산식 개발에 사용된 GP 등조용 降雨時 AN 실측 데이터베이스
Table A1. Parameters of AC transmission lines used to develop the proposed AN prediction formulas in Type-1

Configuration No. Name Type	Line Voltage (kV _{L-L})	Cond. Gradient (G, kV/cm)	No. of Phases (P)	Conductor Parameter		G.W. Diam (cm)	Line Geometry (m)								Calcul. Dist. (D, m)	L ₅ (SLT _{mea} , dBA)	L ₅₀ (SLT _{mea} , dBA)	
				N	d(cm)		S(cm)	D1	D2	D3	D4	H1	H2	H3				H4
1 PPL III	235	15.30	3	1	3.42	0.00	-	3.84	-	-	-	13.7	16.8	-	-	18.27	48.0	45.5
2 Staby I	400	15.93	3	2	3.17	45.0	-	11.0	-	-	-	12.0	-	-	-	28.04	47.2	42.7
3 BPA1 I	525	16.13	3	1	6.35	0.00	-	10.4	-	-	-	18.3	-	-	-	34.8	64.0	61.4
4 BPA3 I	525	16.00	3	3	3.31	45.7	-	10.4	-	-	-	12.2	-	-	-	32.3	49.5	45.3
5 - III	525	16.40	3	4	3.51	45.7	-	4.9	-	-	-	12.2	16.4	-	-	30.0	55.0	52.9
6 Dixon III	538	15.80	3	3	3.61	45.7	-	11.4	-	-	5.72	18.3	28.2	-	-	20.1	51.0	47.0
7 - I	765	20.10	3	4	2.96	45.7	0.98	13.7	-	22.3	-	18.3	-	30.5	-	33.5	61.8	58.6
8 KEPCO1 II	765	15.17	6	6	2.96	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	24.3	40.3	56.3	70.1	22.8	53.0	49.2
9 KEPCO1 II	765	15.17	6	6	2.96	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	24.3	40.3	56.3	70.1	27.3	52.8	48.8
10 KEPCO1 II	765	15.17	6	6	2.96	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	24.3	40.3	56.3	70.1	64.2	49.6	44.7
11 KEPCO2 II	765	14.81	6	6	3.04	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	24.3	40.3	56.3	70.1	64.2	51.3	44.9
12 KEPCO3 II	765	12.32	6	6	3.84	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	24.3	40.3	56.3	70.1	25.5	52.1	43.0
13 Apple-C I	775	23.03	3	4	2.54	45.7	-	13.7	-	-	-	20.7	-	-	-	34.5	63.0	61.0
14 KEPCO1 II	783	15.57	6	6	2.96	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	24.3	40.3	56.3	70.1	27.3	53.4	50.4
15 KEPCO1 II	800	15.87	6	6	2.96	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	24.3	40.3	56.3	70.1	27.3	53.8	51.6
16 KEPCO2 II	800	15.49	6	6	3.04	40.0	1.61	24.6	23.7	22.8	26.4	23.4	40.3	56.3	70.1	27.3	53.6	51.2
17 GE-8 I	1050	14.80	3	8	3.31	38.9	-	19.8	-	-	-	19.8	-	-	-	35.6	57.5	52.5
18 - I	1100	12.63	3	6	5.59	50.8	-	19.8	-	36.0	-	22.2	-	36.6	-	40.7	57.2	53.2
19 USSR I	1180	19.60	3	8	2.35	-	-	24.5	-	-	-	18	-	-	-	38.2	65.0	62.0
20 - I	1300	12.43	3	8	5.59	46.7	-	19.8	-	-	-	21.4	-	-	-	40.3	58.0	55.3
21 GE-16 I	1450	12.77	3	16	3.31	27.8	-	19.8	-	-	-	21.4	-	-	-	40.3	53.9	50.8
22 AEP-1P IV	1410	15.90	1	9	3.08	41.7	-	-	-	-	-	63.4	-	-	-	26.1	58.2	51.4
23 AEP-1P IV	1690	19.10	1	9	3.08	41.7	-	-	-	-	-	63.4	-	-	-	26.1	64.0	59.7
24 AEP-1P IV	1690	19.10	1	9	3.08	41.7	-	-	-	-	-	63.4	-	-	-	63.7	59.9	56.3